

Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2018



Chaire Mobilité

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

Rapport d'activités 2018

Titulaire

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

Collaborateurs

Pr Martin Trépanier, Pr Nicolas Saunier, Pr Bruno Agard, Pr Owen Waygood
Hubert Verreault, Jean-Simon Bourdeau, Pierre-Léo Bourbonnais, Brigitte Milord – associés de recherche

Partenaires

Ville de Montréal
Autorité régionale de transport métropolitain
Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports
Société de transport de Montréal
Exo (Réseau de transport métropolitain)

Mars 2019

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 (2019). Rapport d'activités 2018, Version préliminaire, Polytechnique Montréal, 117 pages.

Table des matières

Contents

1	Introduction	1
1.1	Mission générale de la Chaire Mobilité	1
1.2	Structure organisationnelle.....	2
1.2.1	Partenaires.....	2
1.2.2	Collaborateurs.....	2
1.2.3	Comité scientifique	2
1.3	Programme de recherche	3
1.4	Contenu du rapport	4
2	Activités de recherche	4
2.1	Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue.....	4
2.1.1	Introduction	4
2.1.1	Objectifs.....	5
2.1.2	Revue de la littérature.....	5
2.1.3	Méthodologie	6
2.1.4	Prototype d'un outil de mesure de l'espace-temps.....	6
2.1.5	Conclusion	9
2.2	Correspondances dans les itinéraires de transport en commun	11
2.2.1	Introduction	11
2.2.2	Mise en contexte.....	11
2.2.3	Problématique	12
2.2.4	Méthodologie proposée.....	12
2.3	Dépendance à l'automobile	14
2.3.1	Introduction	14
2.3.2	Revue de littérature	15
2.3.3	Objectifs.....	16
2.3.4	Méthodologie générale	17
2.3.5	Impacts et résultats escomptés	18
2.4	Modélisation des interactions entre les différents modes de transport.....	19
2.4.1	Introduction	19
2.4.2	Aperçu des connaissances.....	19
2.4.3	Question et objectifs de recherche.....	21

2.4.4	Méthodologie	21
2.4.5	Résultats et contributions attendus.....	24
2.5	Interactions entre les modes sous la perspective de l'usage du métro	26
2.5.1	Introduction	26
2.5.2	Revue de littérature	26
2.5.3	Données.....	27
2.5.4	Méthodologie	28
2.5.5	Résultats	30
2.5.6	Conclusion	34
2.6	Le diagnostic de l'équité sociale des systèmes de transport	35
2.6.1	Introduction	35
2.6.2	Revue de littérature	35
2.6.3	Méthodologie	37
2.6.4	Résultats	38
2.6.5	Conclusion	44
2.7	Développement d'indicateurs de durabilité pour le transport collectif	46
2.7.1	Introduction	46
2.7.2	Indicateurs de durabilité en transport	46
2.7.3	La Pieuvre et le Cercle de causalité	47
2.7.4	État d'avancement des indicateurs.....	47
2.7.5	Potentiel de contact social grâce aux déplacements.....	49
2.7.6	Part d'activité physique recommandée attribuable aux déplacements	52
2.8	Outils d'aide au diagnostic et à la conception de réseaux de transport en commun ...	55
2.8.1	Mise en contexte.....	55
2.8.2	Revue de littérature	55
2.8.3	Méthodologie	58
2.8.4	Aide à la conception- Demande latente	60
2.8.5	Présentation de la zone étudiée	61
2.9	Arbres de choix modal utilisant les ratios de compétitivité.....	63
2.9.1	Problématique	63
2.9.2	Contexte	63
2.9.3	Méthodologie	63
2.9.4	Résultats	64
2.10	Semaine synthétique de déplacements à l'aide d'une enquête OD	80
2.10.1	Introduction	80

2.10.2	Revue de littérature	80
2.10.3	Système d'information	83
2.10.4	Méthodologie	83
2.10.5	Résultats	86
2.10.6	Conclusion	90
2.11	Perspectives de recherche en économie des transports	91
2.11.1	Constats relatifs au cadre d'analyse avantages-coûts	91
2.11.2	Questions de recherche	92
3	Rayonnement	94
3.1	Publications (2018)	94
3.2	Participation à des congrès	95
3.2.1	Congrès annuel du Transportation research board 2018	95
3.2.2	Congrès annuel de l'Association québécoise des transports 2018.....	95
3.2.3	1ères Rencontres Francophones Transport Mobilité 2018.....	96
3.2.4	Autres conférences et présentations	96
3.3	Mémoires et thèses soutenus	97
3.3.1	Thèses de doctorat.....	97
3.3.2	Mémoires de maîtrise	97
4	Références	98

Liste des figures

Figure 1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité.....	3
Figure 2. Partage de la surface de rue selon les usagers ou groupes d’usagers.....	8
Figure 3. Distribution spatiale des types de rues.....	9
Figure 4. Schéma méthodologique - interactions entre les modes	22
Figure 5. Nombre d'embarquements dans le métro selon le jour.....	28
Figure 6. Progression des attributs le long de l’échelle de vulnérabilité	39
Figure 7. Concentration d’individus non vulnérables (V1 à V3, gauche) et hautement vulnérables (V5 à V7, droite).....	40
Figure 8. Poids de chaque comportement (gauche) et attributs reliées (droite).....	40
Figure 9. Poids des profils de mobilité par secteur municipal : automobilistes (tout en haut, droite), usagers du TC (haut, gauche), individus multimodaux (haut, droite), individus actifs (bas, gauche) et gens non mobiles (bas, droite)	41
Figure 10. Distribution de l’accessibilité sur le territoire montréalais.....	42
Figure 11. Carte proportionnelle de la distribution de la population entre les trois typologies...	43
Figure 12. Variations de parts modales entre segments de population et quintiles d’accessibilité	44
Figure 13 - Variation de l'index d'interaction au sein de secteurs ciblés pour quatre caractéristiques socio-démographiques	50
Figure 14 - Visualisation spatiale de la variabilité de l'index d'interaction dans la région montréalaise.....	51
Figure 15. Schéma récapitulatif	58
Figure 16. Processus de création de lignes de désirs	59
Figure 17. Exemple de calcul de disponibilité.....	60
Figure 18. Zone à l’étude.....	61
Figure 19. Arrêts et lignes de bus dans la zone à l’étude.....	62
Figure 20. Description des informations contenues dans les feuilles des arbres de classification	65
Figure 21. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2008 .	65
Figure 22. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2013 .	66
Figure 23. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	67
Figure 24. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	68
Figure 25. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008	70
Figure 26. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2013	71
Figure 27. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	72
Figure 28. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	73
Figure 29. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2008	74
Figure 30. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2013	75

Figure 31. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	76
Figure 32. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	77
Figure 33. Procédure d'imputation d'un système d'activités hebdomadaire	85
Figure 34. Exemple de l'imputation du système d'activités pour une personne	86
Figure 35. Durée moyenne en activité hors-domicile par semaine selon le motif d'activité.....	87
Figure 36. Nombre de jours avec au moins un déplacement.....	88
Figure 37. Nombre de jours avec au moins un déplacement travail	88
Figure 38. Nombre de jours avec au moins un déplacement magasinage.....	89
Figure 39. Comparaison de la durée totale d'activité travail entre l'enquête OD et l'enquête EGS	90

Liste des tableaux

Tableau 1. Variables sélectionnées pour le modèle linéaire en semaine	30
Tableau 2. Coefficients des différents modèles.....	31
Tableau 3. Erreurs quadratiques moyennes des modèles	33
Tableau 4. Échelle de vulnérabilité et représentation des attributs.....	39
Tableau 5. Distribution de la population entre les quintiles d'accessibilité.....	42
Tableau 6. Résumé du développement des indicateurs de durabilité au transport en commun .	48
Tableau 7. Niveau de précision de l'étude de l'activité physique induite par le transport en commun.....	52
Tableau 8. Caractéristiques de l'exemple de déplacement étudié.....	53
Tableau 9. Résultats de l'évaluation de la dépense énergétique recommandée dans le cas exemple	53
Tableau 10. Objectifs d'optimisation pour différents groupes.....	56
Tableau 11. Paramètres à considérer pour l'optimisation du service	57
Tableau 12. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2008	66
Tableau 13. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2013	67
Tableau 14. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	68
Tableau 15. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	69
Tableau 16. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008	70
Tableau 17. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008	71
Tableau 18. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	72
Tableau 19. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	73
Tableau 20. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2008	74
Tableau 21. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2013	75
Tableau 22. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2008	76
Tableau 23. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2013	77
Tableau 24. Taux d'erreur des différents arbres de classification	77
Tableau 25. Premier critère de séparation des différents arbres de classification	78
Tableau 26. Importance des variables des différents arbres de classification, ratios et distances seulement.....	79
Tableau 27. Importance des variables des différents arbres de classification, ratios, distances et attributs de la personne	79
Tableau 28. Taux d'échantillonnage et nombre de ménages disponibles selon le jour de la semaine	83
Tableau 29. Nombre d'activités et durée totale en activité pendant la semaine selon le motif d'activité.....	86

Tableau 30. Pourcentage des ménages avec 0 déplacement d'une certaine activité pendant la semaine	89
---	----

1 Introduction

1.1 Mission générale de la Chaire Mobilité

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

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

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

1.2 Structure organisationnelle

1.2.1 Partenaires

La Chaire Mobilité a été initiée en 2010, par quatre partenaires institutionnels : la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal, le Ministère des transports 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, 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 Boisjoli, professeure adjointe au département des génies civil, géologique et des mines

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

- Hubert Verreault, M.Sc.A., associé de recherche
- Pierre-Léo Bourbonnais, Ph.D., associé de recherche
- Jean-Simon Bourdeau, M.Sc.A., associé de recherche
- Brigitte Milord, M.Sc.Econ., associée 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 :

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

- Pr Kostas Goulias: Laboratoire Geotrans de l'Université de Californie à Santa Barbara (Modélisation de la demande de transport, modèles d'activités, simulations par agents)

1.3 Programme de recherche

Le programme de la Chaire s'articule autour de cinq grands axes de recherche, tel qu'illustré sur la Figure 1 : 1) la modélisation des comportements individuels de mobilité, 2) la modélisation des facteurs ayant une incidence sur les comportements de mobilité, 3) la modélisation des impacts des comportements de mobilité, 4) l'expérimentation et le développement de méthodes de collecte, traitement et analyse de données et 5) la formulation et l'estimation de scénarios.

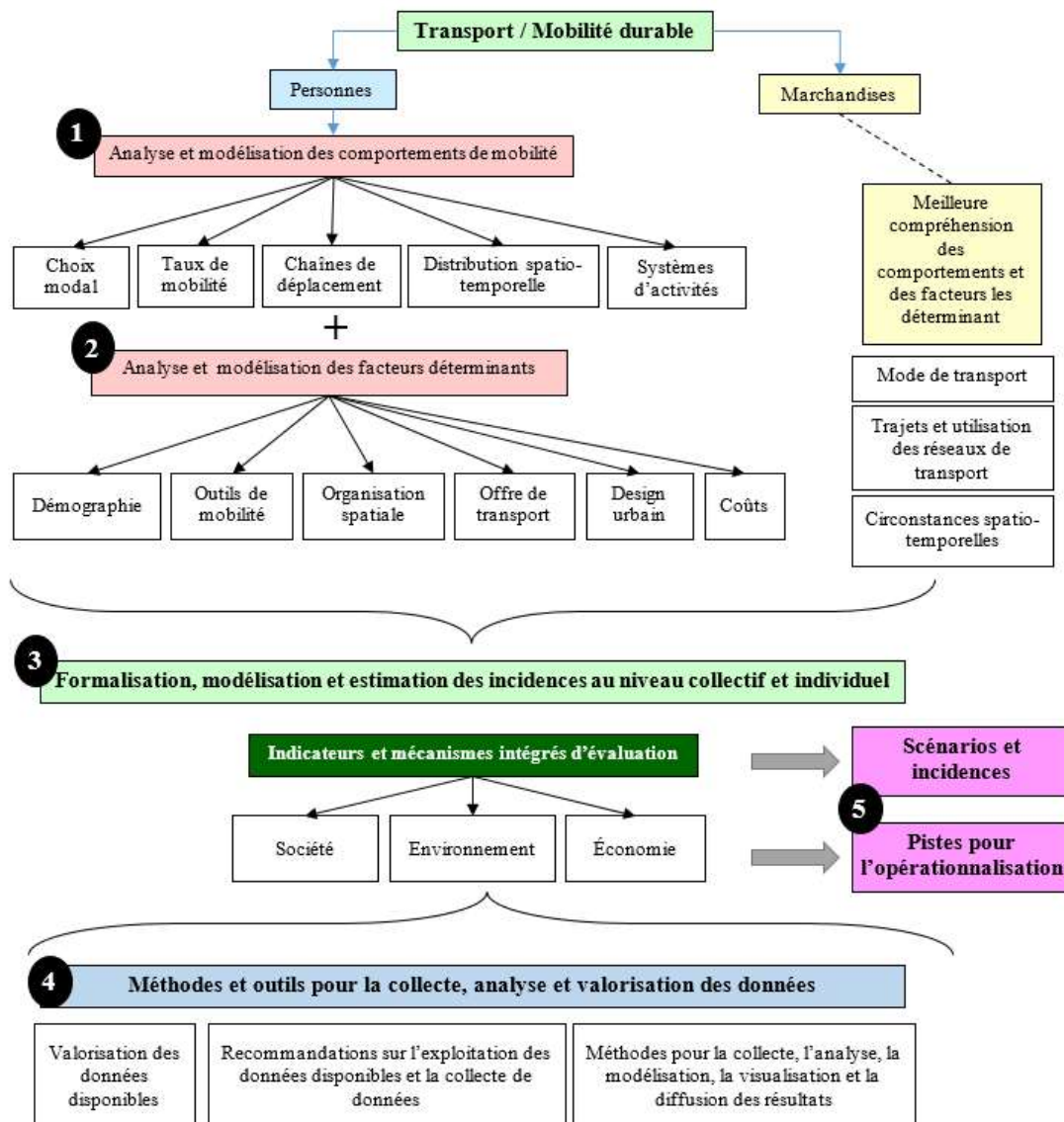


Figure 1. Représentation schématique du programme de recherche de la Chaire Mobilité

1.4 Contenu du rapport

Ce document fait état des activités de recherche conduites du 1^{er} janvier au 31 décembre 2018. Tous les partenaires n'ayant pas confirmé leur participation à la même date, le début des activités complètes de la Chaire ne s'est fait qu'en janvier 2017, avec certains étudiants toujours actifs en continuité des travaux amorcés lors du premier mandat et d'autres ayant amorcé leur réflexion au courant de l'automne.

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.

2 Activités de recherche

2.1 Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue

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

2.1.1 Introduction

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

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

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

2.1.1 Objectifs

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

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

2.1.2 Revue de la littérature

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

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

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

Du point de vue méthodologique, les approches existantes sont pour la plupart basées sur des méthodes manuelles de collecte de données, ce qui limite leur potentiel de généralisation à une

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

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

2.1.3 Méthodologie

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

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

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

2.1.4 Prototypage d'un outil de mesure de l'espace-temps¹

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

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

objectifs d'augmentation de la part modale des modes actifs et collectifs inscrits dans les politiques publiques.

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

Des algorithmes de mesure de la superficie allouée à chaque type d'utilisateur de la rue sont tout d'abord créés. Une typologie de rues sur le territoire de la ville de Laval est ensuite développée à partir des mesures prises. Finalement, à l'aide d'une base de données d'inscriptions scolaires, les itinéraires les plus courts entre le domicile et l'école des étudiants lavallois sont calculés et caractérisés en fonction du partage des rues qu'ils empruntent.

2.1.4.1 Méthodologie

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

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

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

2.1.4.1.1 Préparation des données

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

2.1.4.1.2 Allocation de l'espace à différents usagers

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

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

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

2.1.4.2 Résultats

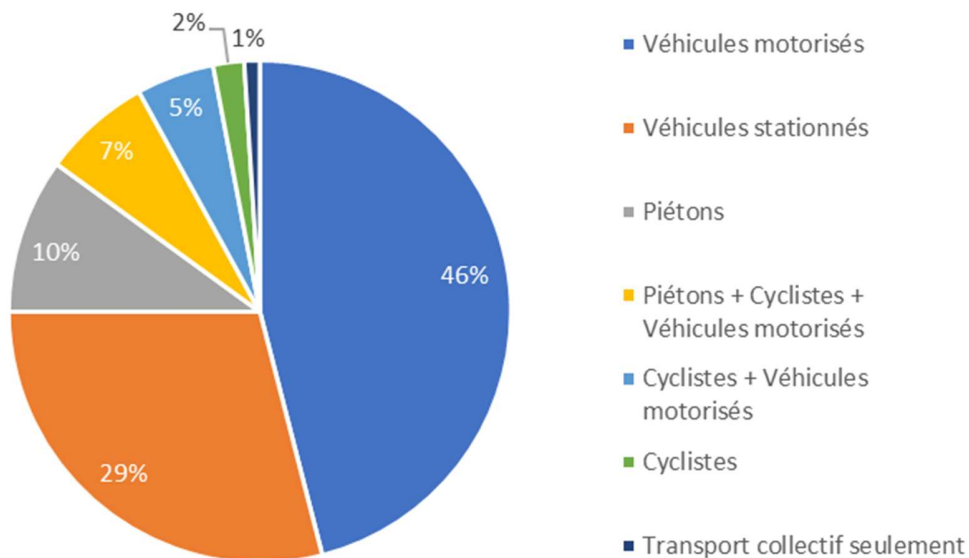


Figure 2. Partage de la surface de rue selon les usagers ou groupes d'usagers

2.1.4.2.1 Partage de la surface de rue

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

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

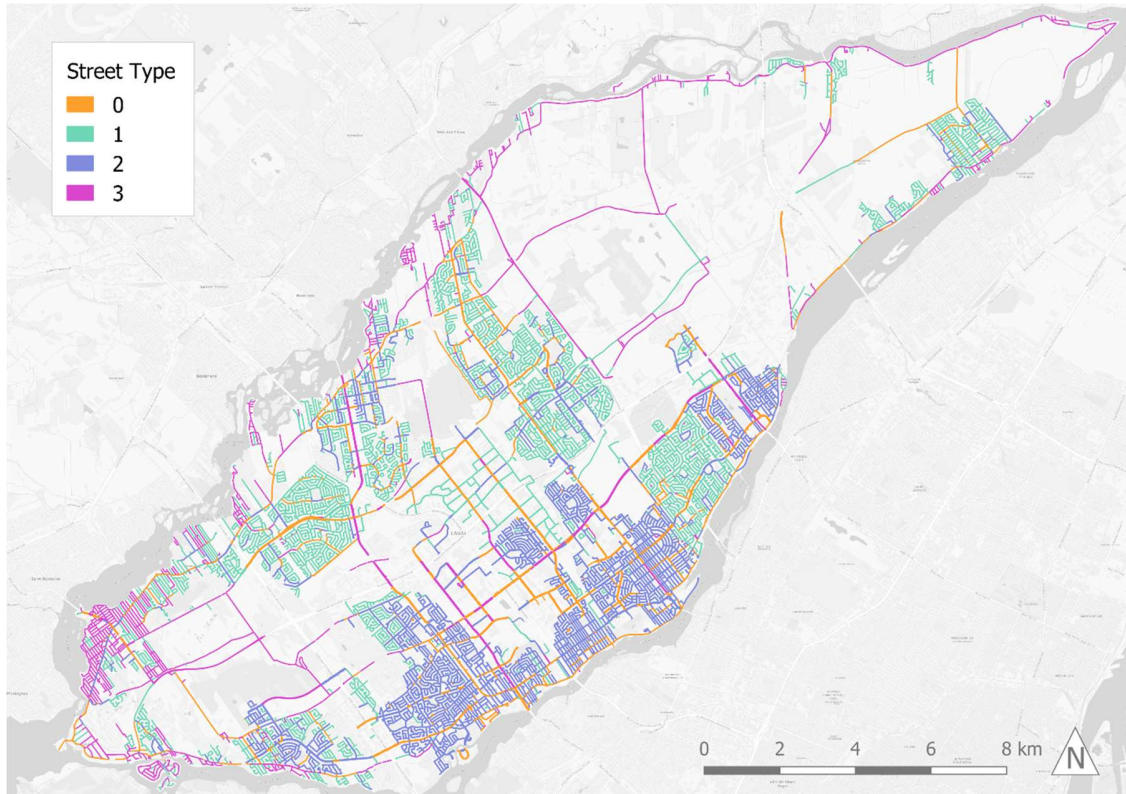


Figure 3. Distribution spatiale des types de rues

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

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

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

2.1.5 Conclusion

Le partage de la rue pour différents usagers et combinaisons d'usagers est calculé pour le territoire de Laval en utilisant une base de données de surfaces de rues ainsi que des données sur

le réseau routier, l'environnement urbain et la composition des quartiers. La part dominante de l'espace urbain allouée aux véhicules motorisés, que ce soit pour leur circulation ou leur entreposage, est ainsi soulignée.

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

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

2.2 Correspondances dans les itinéraires de transport en commun

- Par : Laurent-David Beaulieu, doctorat – cet étudiant a maintenant abandonné ses études
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire Mobilité

2.2.1 Introduction

L'objectif du projet est de comprendre la perception des usagers vis-à-vis des correspondances dans les itinéraires de transport en commun. Pour ce faire, les données de l'enquête OD et celles des cartes à puce sont mises à contribution pour analyser les comportements actuels de correspondance (nœuds et lignes impliqués) ainsi que l'impact de ces correspondances sur le choix des trajets pour différentes clientèles. Ces ensembles de données reflètent les choix actuels de trajets sur les réseaux de transport en commun et permettent de développer des fonctions de coût représentatives des choix observés. En plus d'inclure des composantes liées aux temps de déplacement (temps d'accès, d'attente, en véhicule), ces fonctions doivent tenir compte du nombre de correspondances, des types de correspondance et de leurs impacts sur le temps perçu de réalisation du déplacement avec un itinéraire donné. Ce projet vise à contribuer à l'évaluation de la composante correspondance dans les fonctions de coûts.

2.2.2 Mise en contexte

Les correspondances sont une étape des transports qui impose une coupure dans le flot de déplacements des usagers. Que ce soit pour une transition entre deux différents modes ou pour la transition entre différentes offres de service d'un même mode, l'utilisateur doit traverser plusieurs étapes qui ne sont pas nécessairement agréables pour atteindre le nouveau support qui lui permettra de se rendre à destination.

Les chercheurs se sont intéressés à la position optimale des arrêts d'autobus (Ceder, Butcher et Wang, 2015; Ibeas, dell'Olio, Alonso et Sainz, 2010), ainsi qu'aux fréquences de passage qui incitent à la fidélisation de la clientèle (Lierop, Badami et El-Generdy, 2018). Plusieurs recherches ont aussi été réalisées pour comprendre la perception des usagers face aux temps associés à chaque étape du transport : le temps d'attente, de marche, de retard, etc. (Ji, Gao, Fan, Zhang et Zhang, 2017; Wardman, Chintakayala et de Jong, 2016).

Les chercheurs se sont intéressés à la position optimale des arrêts d'autobus (Ceder, Butcher et Wang, 2015; Ibeas, dell'Olio, Alonso et Sainz, 2010), ainsi qu'aux fréquences de passage qui incitent à la fidélisation de la clientèle (Lierop, Badami et El-Generdy, 2018). Plusieurs recherches ont aussi été réalisées pour comprendre la perception des usagers face aux temps associés à chaque étape du transport : le temps d'attente, de marche, de retard, etc. (Ji, Gao, Fan, Zhang et Zhang, 2017; Wardman, Chintakayala et de Jong, 2016).

La méthodologie pour quantifier l'impact des correspondances dans les réseaux de transports est souvent sous la forme d'études de cas où on s'intéresse aux préférences révélées des usagers à l'intérieur des liens majeurs des réseaux de transports en commun (Guo et Wilson, 2011).

Grâce aux travaux de Wardman (Wardman, 2001, 2004; Wardman et al., 2016), il est maintenant possible de comprendre la perception des temps de transport en général. On comprend que les temps d'attente et de marche sont perçus de manière plus négative que le temps « en véhicule ». Bien que les commodités à l'intérieur des nœuds de correspondances ont un impact positif sur l'appréciation des usagers (Chowdhury et Ceder, 2016; Ji et al., 2017), la perception du temps lors des correspondances n'en demeure pas plus compétitive qu'avec celle du temps « en véhicule ». Bref, considérant qu'une correspondance est une étape du transport où il faut normalement

attendre et marcher, il devient clair que celle-ci n'attire pas des usagers simplement pour le plaisir. Les usagers des correspondances sont ainsi, a priori, des voyageurs qui décident de manière utilitaire d'interrompre leur trajet pour profiter de gains de temps ou simplement pour des gains d'accessibilité pour atteindre des destinations inatteignables sans correspondances.

Dans un autre ordre d'idées, plusieurs travaux ont été effectués pour caractériser les systèmes de transports en commun (Fortin, 2016). La connectivité et la qualité (TQSM) sont régulièrement analysées par les chercheurs.

2.2.3 Problématique

En ce qui a trait à la grande région de Montréal, il n'existe pas d'inventaire des correspondances disponibles et utilisées par les utilisateurs du transport en commun. Cette première étape est importante pour comprendre le comportement des usagers à l'intérieur du réseau.

C'est pourquoi dans le cadre de ce travail, l'interaction entre les services de transports en commun est étudiée largement. Au-delà des nœuds de correspondances, la recherche est axée sur les combinaisons d'arrêts accessibles à distance de marche. À notre connaissance, il y a très peu de littérature s'intéressant aux paires d'arrêts de transport en commun en tant que métrique pour comprendre l'efficacité d'un réseau dans son milieu.

Chowdhury et Ceder (2013) proposent une division des correspondances entre planifiées ou non. Par ailleurs (Vuchic, 2005, p. 241) divise les types de correspondances selon la différence d'intervalle (court et long) entre la ligne d'origine et celle de destination. En outre, peu de recherche a été réalisée pour comprendre si les différents types de correspondances sont utilisés de manières similaires par différents types d'usagers.

Ce qui est ainsi proposé dans cette recherche est une nouvelle méthodologie pour capter la connectivité d'un système de transport en commun, notamment guidé par les questions de suivantes:

- Quels sont les objets définissant les correspondances;
- Quels sont les types de correspondances;
- Quels est le taux d'utilisation des correspondances et
- Quel est le profil des utilisateurs qui utilisent des plaques tournantes de correspondances.

2.2.4 Méthodologie proposée

Pour comprendre le phénomène des correspondances, plusieurs sources de données sont disponibles. En travaillant avec les GTFS, l'enquête OD et les données des cartes à puce, il sera possible de faire avancer le travail de recherche. Le premier objectif de ce projet est de caractériser les plaques tournantes de correspondances sur l'île de Montréal. Pour ce faire, les étapes suivantes sont en cours :

1. Définition des objets caractérisant les correspondances
2. Caractérisation des échanges entre les lignes TC en fonction des objets
3. Quantification des échanges entre les lignes en fonction :
 - a. De l'enquête OD
 - b. Des données des cartes à puce
4. Regroupement des correspondances similaires de manière hiérarchique en fonction des objets les définissant et de leur utilisation.
5. Classification des plaques tournantes de correspondance en fonction de l'utilisation.

Puis, l'objectif suivant de ce projet de recherche est de quantifier l'impact des correspondances sur le coût (généralisé) de déplacement de l'utilisateur. Pour ce faire, des fonctions d'utilités doivent être développées pour intégrer les temps d'accès, les temps d'attente, la perception du confort et du niveau de sécurité des différents segments du trajet. L'hypothèse de base est que les types de correspondance auront des impacts variés sur le coût perçu par les différents types d'utilisateurs.

2.3 Dépendance à l'automobile

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

2.3.1 Introduction

Les cris d'alarme concernant les conséquences à venir des changements climatiques se sont intensifiés dans les dernières années. Devant l'urgence d'agir, les systèmes de mobilité urbains hérités du siècle dernier et centrés sur le recours massif à l'automobile comme principal mode de déplacement sont remis en question. En plus des impacts sur les changements climatiques, de tels systèmes de transport génèrent des externalités négatives majeures sur la société. Les conséquences d'une dépendance collective à la voiture se font sentir sur la santé publique (problèmes respiratoires, accidents de la route, embonpoint lié à la sédentarité, etc.), les finances de l'État (augmentation des dépenses en infrastructures routières, en santé, etc.), les finances personnelles (augmentation de la part des revenus des ménages dédiés aux transports) et sur l'économie (coût énorme de la congestion routière). Devant ces constats, la société civile et les pouvoirs publics affichent une volonté croissante de réduire notre dépendance collective à l'automobile et de transiter vers une mobilité plus durable comme en témoigne la Politique de Mobilité durable 2018-2030 du Gouvernement du Québec (Gouvernement du Québec, 2018). Depuis le tournant des années 2000, les transports collectifs et le vélo ont pu profiter d'un regain de popularité dans les grandes villes occidentales. Ces villes ont aussi vu apparaître sur leur territoire une variété de services de mobilité (autopartage, véhicules en libre-service, vélopartage, covoiturage, transport sur demande, etc.) comme alternatives à l'utilisation de la voiture privée en solo. Dans les cœurs urbains, il est maintenant prouvé que la croissance rapide de ces services de mobilité a un impact sur les comportements de mobilité en permettant de réduire les déplacements effectués en voiture (Fishman, Washington, & Haworth, 2014; Sioui, Morency, & Trépanier, 2013).

Alors que les études confirment l'influence, sur les comportements de mobilité, de ces nouveaux services de mobilité, à plus long terme, ceux-ci peuvent-ils contribuer à réduire la motorisation des ménages (taux de possession automobile des ménages? Si l'influence de certains déterminants (milieu bâti, revenu et composition du ménage, etc.) sur la motorisation des ménages est largement documentée (Clark, Lyons, & Chatterjee, 2016), les effets combinés de la disponibilité de ces nouvelles offres de mobilité ont été peu étudiés et demeurent très mal compris. Cette question est critique pour deux raisons. D'une part parce que les statistiques d'immatriculation indiquent qu'au cours des 20 dernières années le nombre de voitures en circulation a augmenté de 35 % au Québec et de 37 % au Canada. Ces augmentations ont été respectivement, 2,4 fois et 1,8 fois plus rapide que la croissance de la population (Statistique Canada, 2018). D'autre part, parce que la popularité de ces services, notamment auprès des jeunes générations (Circella et al., 2016), indique qu'il devient essentiel d'en comprendre les processus d'adoption par les usagers et de tenir compte de leur influence sur la motorisation des ménages. En somme, alors que les villes visent à favoriser le développement des alternatives à la voiture, il devient essentiel d'avoir les outils pour évaluer les impacts de leur déploiement combiné sur la croissance du parc de véhicules personnels. Ces outils sont nécessaires pour planifier adéquatement le déploiement sur le territoire de systèmes de mobilité durable et ainsi réduire la dépendance à la voiture.

2.3.2 Revue de littérature

L'intérêt pour la motorisation des ménages n'est pas nouveau, c'est même l'un des sujets les plus documentés de la recherche en transport. Ainsi, certains auteurs l'utilisent comme variable explicative du comportement de mobilité. Par exemple, il est démontré qu'un ménage qui possède une ou plusieurs voitures va effectuer plus de déplacements en voiture qu'un ménage qui n'en a pas (Dieleman, Dijst, & Burghouwt, 2002). Le fait de posséder une voiture augmente aussi les distances parcourues (Krizek, 2003). Cependant, des recherches plus récentes, notamment par Van Acker and Witlox (2010), critiquent cette vision simpliste de la possession automobile comme variable indépendante, démontrant que la possession automobile agit plutôt comme variable médiatrice entre l'environnement bâti et l'utilisation de la voiture. Ces mêmes auteurs argumentent d'ailleurs qu'en raison de l'importance de la possession automobile sur l'utilisation de la voiture, il devient nécessaire d'identifier et de mettre en place des mesures visant à freiner la croissance du parc automobile (Van Acker & Witlox, 2010). Pour identifier comment réduire la motorisation des ménages, il est donc nécessaire d'en comprendre les déterminants. Les caractéristiques du milieu bâti (aussi appelées variables de voisinage), sur la motorisation des ménages sont largement documentées (Bhat & Guo, 2007). C'est aussi le cas de variables sociodémographiques comme le revenu, la composition du ménage (âge, occupation des membres, présence d'enfants, etc.) (Anowar, Yasmin, Eluru, & Miranda-Moreno, 2014; Caulfield, 2011) et même l'attitude des personnes envers la voiture (Flamm, 2009; Van Acker, Mokhtarian, & Witlox, 2014).

Tel que mentionné dans la section précédente, la diversification récente des services de mobilité dans les villes vient rajouter des variables pouvant avoir une influence sur la motorisation des ménages. Les effets de ces nouveaux services de mobilité sont généralement étudiés en silo. Par exemple, plusieurs études ont tenté d'évaluer, via des sondages, si l'abonnement à un service d'autopartage amène des changements dans les taux de possession automobile. Ainsi, Martin, Shaheen, and Lidicker (2010) ont observé qu'en Amérique du Nord, les ménages qui se sont abonnés à l'autopartage ont réduit de façon significative le nombre moyen de véhicules possédés en plus d'éviter l'achat de nouveaux véhicules. En agrégeant les résultats, ils ont aussi évalué que chaque véhicule d'autopartage disponible permet de retirer 9 à 13 véhicules personnels des routes. Toutefois, Klinevicius, Morency, and Trépanier (2014) jugent que ce type d'évaluation basée uniquement sur des données de sondage de membres de services d'autopartage peut contenir de nombreux biais de déclaration et ne permet pas d'évaluer à l'échelle d'une ville les changements dans la motorisation des ménages découlant de la présence de ces services. Leur propre modèle de régression linéaire, développé avec des données de 1998, 2003 et 2008 pour Montréal, semble indiquer que la disponibilité de stations d'autopartage permet de ralentir la croissance de la motorisation dans les secteurs ciblés. Devant ces résultats, il importe de mettre à jour ces analyses et d'utiliser des modèles plus complexes (ordonné ou multinomial logit par exemple) afin de mieux évaluer la relation entre la présence de services d'autopartage, la disponibilité dans un même secteur d'autres services de mobilité (vélopartage, transport collectif, taxis commandés par applications mobiles, etc.) et les variables traditionnelles d'influence des taux de motorisation.

Au niveau des services de vélopartage (BIXI), les plus récentes revues de la littérature sur ce service, notamment Fishman (2016), Fishman et al. (2014), Ricci (2015) se concentrent sur les

changements dans les comportements de mobilité, mais n'abordent pas l'influence du vélopartage sur la possession automobile des ménages. Au-delà de l'autopartage et du vélopartage, l'impact des services de mobilité sur demande (covoiturage par application, Uber, Lift, services de taxi commandés par application) devra aussi être évalué en contexte québécois même si une étude récente semble démontrer le peu d'influence de ces services sur la possession automobile aux États-Unis (Clewlow, 2017). En somme, les effets combinés sur la motorisation des ménages de l'apparition de ces nouvelles offres de transport et de leur complémentarité avec le transport en commun ont été peu étudiés. Au-delà de l'influence de la disponibilité de ces services de mobilité alternatifs sur la possession automobile, il importe aussi de s'intéresser au processus d'adoption de ces services par les ménages, notamment aux variables pouvant avoir une incidence sur le choix de s'abonner au vélopartage, à l'autopartage et au transport en commun. En ce sens, des études recommandent d'ailleurs de migrer vers le concept « d'outils de mobilité » comme cadre d'analyse plus large que la simple possession automobile (Scott & Axhausen, 2006). Le concept d'outils de mobilité englobe les abonnements aux divers services de mobilité (autopartage, vélopartage, transport en commun) et les véhicules possédés (vélos, scooter, voitures, etc.).

Finalement, dans une perspective de prévision de l'évolution de la motorisation à long terme, des modèles multinomial logit ont été utilisés pour simuler divers scénarios d'évolution des taux de possession automobile, par exemple en Allemagne (Ritter & Vance, 2013). Il est proposé de construire sur ce type de modèle afin de développer des modèles complets d'acquisition d'outils de mobilité dans lesquels sont inclus la modélisation de la possession automobile. Ces modèles permettront de développer différents scénarios d'évolution future de la motorisation des ménages en relation avec l'adoption des services d'autopartage, de vélopartage et des changements dans l'offre de service de transport en commun.

2.3.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche est d'évaluer les impacts combinés du déploiement des services de mobilité sur la motorisation des ménages en s'appuyant sur plusieurs ensembles de données en transport (données d'utilisation des services de mobilité, enquêtes Origine-Destination, statistiques d'immatriculation, données socio-démographiques, etc.).

Pour atteindre cet objectif général, plusieurs sous-objectifs sont formulés :

- Développer des processus automatisés de suivi et d'analyse de l'évolution de la motorisation des ménages et de l'adoption des services de mobilité (vélos, abonnements à l'autopartage, le vélopartage et le transport collectif, etc.) en se branchant sur les flux de données existants provenant de ces services, sur les données des enquêtes de mobilité et sur les données annuelles d'immatriculation.
- Évaluer à l'aide des données de l'enquête Origine-Destination l'écart entre les besoins en motorisation des ménages et leur motorisation réelle observée afin mesurer l'étendue de la dépendance non-structurale à la voiture. En d'autres mots, le nombre de voitures pouvant être retirée de chaque ménage pour une journée moyenne de semaine et pour une semaine moyenne reconstituée.

- Développer des outils de modélisation de la motorisation des ménages et de modélisation des processus *d'acquisition des outils de mobilité* en s'appuyant sur les données recensées en transport avec les données de caractérisation des ménages et du voisinage.
- Évaluer, à l'aide de ces outils, les facteurs de co-influence de ces services et déterminer si leur complémentarité permet de ralentir la croissance des taux de motorisation dans les secteurs desservis en réduisant les besoins de possession automobile par les ménages.
- À l'aide de ces outils, modéliser et simuler des scénarios de déploiement de services de mobilité alternatifs sur le territoire afin d'évaluer les impacts sur la croissance future du parc automobile et les taux de motorisation en découlant.

2.3.4 Méthodologie générale

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs étapes clés devront être réalisées :

1) Revue de la littérature

Plusieurs thèmes devront être explorés :

- Déterminants de la motorisation des ménages et facteurs menant à des changements dans les taux de motorisation;
- Déterminants de l'adoption des nouveaux services de mobilité par les ménages;
- Modélisation de la motorisation des ménages et de l'adoption des services de mobilité;
- Scénario d'évolution de la motorisation des ménages;
- Processus de fusion d'ensembles de données.

2) Recensement, acquisition et fusion des ensembles de données

- Recensement des ensembles de données de transport et autres données pertinentes pouvant être mis à contribution dans la modélisation de la motorisation des ménages et de l'acquisition d'outils de mobilité;
- Développement d'une procédure automatisée d'analyse et de traitement de ces flux de données afin de pouvoir effectuer un suivi annuel des différents indicateurs de motorisation et d'accès à des outils de mobilité.

3) Évaluation du nombre de voitures pouvant être retirées dans le grand Montréal.

- Déterminer un processus simple d'évaluation des déplacements latents à la marche (méthode déjà établie), à vélo (méthode déjà établie), en transport collectif, en autopartage / véhicule libre-service, ou suivant une combinaison de ces modes.
- Calculer pour chaque ménage le nombre de voitures pouvant être retirées pour une journée moyenne de semaine et pour une semaine reconstituée (méthode établie par la Chaire Mobilité).
- Établir les zones avec le plus grand potentiel de retrait de voiture.

4) Développement d'outils de modélisation et de simulation

- Développement de modèles (multinomial logit ou logit ordonné ou autre) de motorisation des ménages et de modèles d'adoption des services de mobilité alternatifs prenant en entrées les flux de données recensés ainsi que des typologies de ménage et de voisinage déjà établies en contexte québécois;
- Fusion de ces modèles en un modèle intégré de possession *d'outils de mobilité*.

5) Modélisation et simulation de scénarios de déploiement des services de mobilité

- Élaboration de scénarios d'évolution de la motorisation et d'acquisition d'outils de mobilité en fonction des prévisions démographiques, des changements dans les politiques publiques, des changements dans la disponibilité des services de mobilité alternatifs et les changements dans le partage des espaces urbains.
- Formulation de recommandations stratégiques destinées aux autorités responsables de la planification de l'offre de transport sur le territoire afin de prioriser le déploiement des alternatives qui permettent de ralentir la croissance de la possession automobile sur le territoire.

2.3.5 Impacts et résultats escomptés

Le projet permettra de raffiner la compréhension des déterminants ayant une incidence sur la motorisation des ménages en évaluant notamment l'impact de la disponibilité et de l'adoption de services de mobilité alternatifs à la voiture. L'originalité du projet repose sur une approche intégrée visant à évaluer si la disponibilité combinée de ces différents services sur un territoire donné est complémentaire et contribue à réduire les besoins en possession automobile et donc à réduire la dépendance à l'automobile. Par exemple, comment la présence de stations de métro, d'arrêts d'autobus, de stations d'autopartage (Communauto), de véhicules en libre-service (Auto-Mobile, car2go), de stations BIXI, de postes d'attente de taxi, etc. affecte la motorisation des ménages dans les secteurs où ces services sont disponibles.

Au niveau des impacts, le projet vise à être élaboré en collaboration avec les partenaires de la Chaire Mobilité et avec des organismes comme le CIRODD et Transition Énergétique Québec. Le projet pourra ainsi bénéficier des meilleures pratiques en transfert de connaissance afin que la procédure de suivi et les outils de modélisation des indicateurs de motorisation et d'acquisition d'outils de mobilité puissent être intégrés aux exercices de planification de l'offre de transport sur le territoire québécois par les différentes autorités publiques. Il est aussi souhaitable que les recommandations en conclusion de ce projet sur les stratégies de réduction des taux de possession automobile puissent être reprises comme argumentaire par la société civile et ultimement, s'intégrer dans les politiques publiques en transport, mobilité et aménagement du territoire.

2.4 Modélisation des interactions entre les différents modes de transport

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

2.4.1 Introduction

Au cours des dernières années, le rapide développement des technologies et l'évolution des systèmes d'information et de communication ont permis une diversification des modes de transport. En particulier, des modes partagés tels que le covoiturage, l'autopartage, le vélopartage ou encore le microtransit sont venus compléter l'offre du cocktail transport. Les modes actifs (vélo et marche) ont également vu leur popularité augmenter grâce au récent déploiement d'infrastructures et de programmes visant à encourager l'utilisation de ces moyens de transport verts, tels que le programme « À pied, à vélo, ville active » (Vélo Québec, 2015). Montréal est un exemple concret de ville dans laquelle une panoplie de modes sont présents : automobile privée, transport en commun (métro, bus, train), vélo, marche, taxi, autopartage (basé stations ou avec véhicules en libre-service), covoiturage, vélopartage, etc.

Dans un contexte où la mobilité se veut durable, cette diversification de l'offre de transport est primordiale. En effet, la multimodalité (présence de nombreux modes de transport différents) et l'intermodalité (combinaison de plusieurs modes de transport pour un même trajet) sont des conditions nécessaires pour réduire l'utilisation de l'automobile : la multiplication des options de déplacement permet de proposer des alternatives à ce mode polluant, moteur de la congestion routière et cause d'externalités négatives sur la santé humaine, les finances (publiques et personnelles) et la qualité de vie. La complémentarité de tous les modes de transport et l'optimisation des temps de correspondance permettent également de répondre plus efficacement aux besoins de plus en plus complexes des usagers. En outre, la création de nouvelles possibilités de trajets (par l'utilisation de modes différents) génère un gain en accessibilité aussi bien au niveau temporel que spatial, les individus pouvant alors atteindre davantage de destinations avec un choix d'horaires plus varié (Vivre en Ville, s.d.).

Malgré tous les bénéfices éventuels d'une offre de transport diversifiée, chaque moyen de transport est le plus souvent analysé et planifié de manière indépendante, ses interactions avec les autres modes restant ainsi mal comprises. L'influence interne (au système de transport) de l'utilisation d'un mode sur l'utilisation des autres modes n'a pas explicitement été prouvée, et les reports modaux dus à des facteurs exogènes comme la météo ou les perturbations du service ont été peu mesurés. Ce manque de connaissances rend impossible une compréhension globale et une gestion simultanée de l'ensemble des services de transport. De même, la prévision de la demande de transport est encore aujourd'hui unimodale (ou au mieux bimodale), sans prise en compte des corrélations d'usage entre les différents moyens de transport. Les méthodes actuelles ne permettent donc pas de proposer des stratégies de planification intégrées qui pourraient pourtant faire une réelle concurrence à l'auto solo (automobile occupée par une seule personne). Par conséquent, de nouveaux outils doivent être développés afin d'aider à atteindre l'objectif de réduction de 20% des déplacements effectués en auto solo ciblée pour 2030 dans la Politique de Mobilité durable du Québec (Ministère des Transports de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 2018).

2.4.2 Aperçu des connaissances

De nombreux acteurs du transport (autorités publiques, industriels, opérateurs, chercheurs et usagers) s'accordent à dire que la mobilité du futur sera multimodale et connectée (Ferraris, 2018;

Spickermann et al., 2014). De tels scénarios présentent la mobilité comme un service qui intègre tous les modes de transport grâce à une seule et même application fournissant de l'information personnalisée en temps réel. Concordant avec cette tendance, quelques études ont démontré une acceptation grandissante des modes alternatifs et une réduction de la dépendance à l'automobile dans les zones urbaines denses (Schuppan et al., 2014). Néanmoins, il a été prouvé qu'un manque de synchronisation entre les différents modes de transport entraînait une diminution de la multimodalité des déplacements (Gallotti & Barthelemy, 2014). D'après Spickermann et al. (2014), des collaborations incluant toutes les parties prenantes doivent donc être mises en place pour encourager cette mobilité multimodale et durable. Toutefois, peu de recherches ont actuellement été menées afin de guider les opérateurs des différents réseaux à agir de manière coordonnée.

En outre, la multimodalité est en constante croissance et de nouveaux modes de transport ont récemment été implantés dans les villes. Les effets de ces modes émergents sur les services classiques de transport sont donc encore peu connus. De plus, dans un contexte où certaines villes d'Amérique du Nord commencent à voir l'achalandage du transport en commun diminuer, des questions se posent quant à la complémentarité versus la compétitivité de ces modes (Feigon & Murphy, 2018). Quelques travaux ont notamment été réalisés pour examiner les impacts du vélopartage (Fishman et al., 2014; Martin & Shaheen, 2014) ou de l'autopartage (Feigon & Murphy, 2018; Sioui et al., 2013) sur l'utilisation de l'automobile ou du transport en commun. Cependant, les conclusions tirées de ces recherches sont parfois contradictoires. De surcroît, ces études n'impliquent généralement que deux modes de transport (un mode émergent et un mode classique) et ne permettent donc pas d'avoir une vision macroscopique de toutes les interactions simultanées des différents systèmes de mobilité, ni de leurs effets combinés ou réciproques. Ainsi, le rôle de chaque mode au sein du système complet n'a pas encore été clairement déterminé, et rien n'assure pour le moment qu'une offre de transport diversifiée sera également une offre complémentaire.

De même, la planification des réseaux de transport est majoritairement basée sur des prédictions faites séparément pour chaque mode de transport. Dans le cas de Montréal, le MOTREM (Modèle de transport de la région de Montréal), développé par le Service de la modélisation des systèmes de transport du Ministère des transports, comprend un modèle de transfert modal permettant de traiter les déplacements bimodaux, mais seuls les modes « automobile » et « transport en commun » sont pris en compte (Tremblay, 2002). Dans la littérature scientifique, de nouvelles approches reposant sur des systèmes d'activités (Chow & Djavadian, 2015) ou multi-agents (Atmani, 2015) commencent à être développées dans le cadre de réseaux de transport multimodaux. Toutefois, ces modèles considèrent un nombre limité d'alternatives de transport et n'intègrent généralement pas les modes émergents (partagés ou actifs). Ils nécessitent également une formulation plus accessible, un paramétrage plus représentatif et une validation plus robuste avant leur possible opérationnalisation. Par ailleurs, la majorité des modèles recensés sont encore basés sur un jour moyen de semaine alors que la variabilité des comportements de mobilité a largement été prouvée (Verreault & Morency, 2011). Ces modèles sont statiques dans le temps et ne tiennent donc pas compte de l'évolution de la demande et de l'offre.

Ces limitations sont essentiellement dues à un manque de données multimodales et longitudinales. En effet, il n'existe pas de base de données unique décrivant l'utilisation continue de tous les modes de transport. Outre les problématiques liées à l'échantillonnage et à la transversalité des données des enquêtes traditionnelles, les modes actifs et alternatifs sont

souvent sous-représentés. Différents flux de données passives pourraient être exploités, mais ceux-ci sont généralement recueillis de manière indépendante pour chaque mode de transport. Une solution serait alors de fusionner plusieurs ensembles de données. Principalement utilisées avec les technologies des systèmes de transport intelligents (Faouzi & Klein, 2016) telles que les technologies de capteurs, les techniques de fusion de données peuvent s'appliquer dans de nombreux autres cas visant à intégrer des données provenant de différentes sources (Castanedo, 2013). Cependant, ces méthodes impliquent de nombreux enjeux (Bayart et al., 2009). Entre autres, les données sont collectées pour différent(e)s objets, échelles spatio-temporelles, populations et volumes (modes lourds versus modes individuels), mais aussi selon différentes unités (comptages, transactions, réservations, enregistrements sur cellulaire, etc.). Cette hétérogénéité rend difficile l'identification d'un indicateur d'usage commun (Morency et al., 2018). Le défi de la taille est également présent puisque les données massives et continues (telles que les données transactionnelles et GPS) ne cessent de se multiplier.

2.4.3 Question et objectifs de recherche

Cette recherche s'inscrit dans la perspective d'effacer les frontières méthodologiques et analytiques entre l'étude des différents modes de transport et des différentes unités spatio-temporelles pour tendre vers une prédiction multimodale et longitudinale de la demande. Plus particulièrement, la question de recherche qui sera traitée est la suivante : Comment les modes de transport interagissent entre eux et comment modéliser ces interactions pour pouvoir les intégrer aux prévisions de la demande globale de transport ?

Ainsi, l'objectif général de cette recherche est de mieux comprendre et de modéliser les interactions entre les différents modes de transport (classiques et émergents) à partir de sources diversifiées de données.

Plusieurs objectifs spécifiques peuvent être énoncés comme suit :

- Développer de nouvelles méthodes automatisées de valorisation et de fusion de plusieurs ensembles de données de manière à décrire la mobilité dans un seul et même système structuré et exhaustif (incluant des variables contextuelles)
- Analyser les comportements multimodaux de mobilité ainsi que leurs variations dans le temps et dans l'espace afin de créer des patrons d'utilisation de l'ensemble des modes de transport et de mettre en évidence des corrélations d'usage
- Mesurer l'effet de l'offre et de facteurs exogènes comme la météo, les interruptions de service, les événements et les périodes de congés sur l'utilisation des différents modes et donc sur la répartition de la demande totale de transport
- Construire un modèle de prévision multimodale et longitudinale de la demande qui tient compte des interactions entre les modes de transport et de plusieurs autres variables explicatives

2.4.4 Méthodologie

La méthodologie, présentée schématiquement sur la Figure 4, sera composée des étapes énumérées et expliquées brièvement ci-dessous.

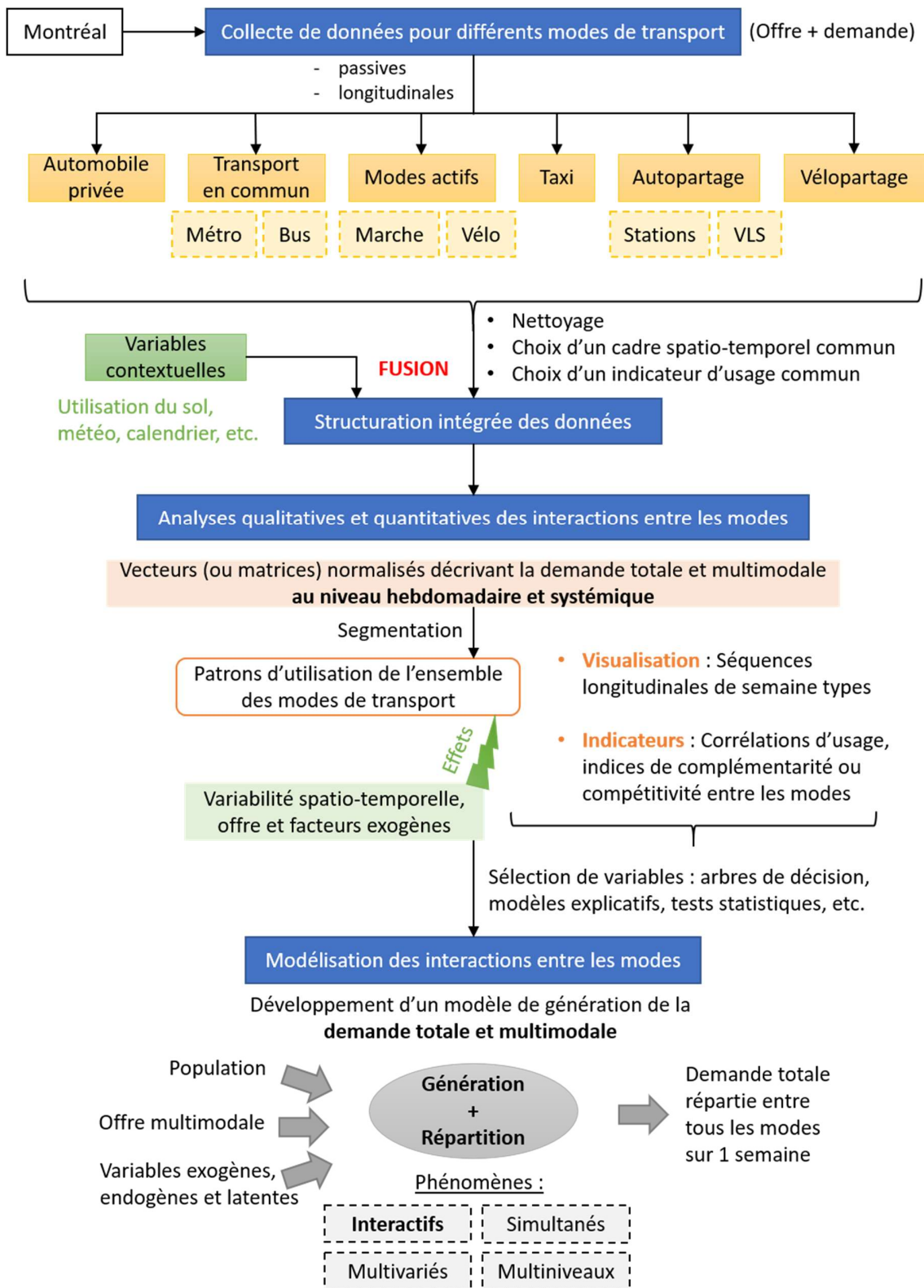


Figure 4. Schéma méthodologique - interactions entre les modes

Revue critique de littérature

La revue de littérature portera sur les thèmes suivants :

- les méthodes d'intégration et de fusion de données provenant de différentes sources, en particulier les méthodes qui permettent l'association complémentaire de plusieurs bases de données (voir la classification proposée par Castanedo (2013));
- l'usage de chaque mode de transport, mais aussi l'analyse de systèmes multimodaux et des interactions entre les modes ;
- les conséquences de l'implantation de nouveaux modes de transport sur les comportements de mobilité, notamment l'utilisation des modes existants ;
- les variables qui influencent le choix modal ;
- la modélisation multimodale et longitudinale de la demande de transport, en particulier à l'aide de modèles évolués permettant de capturer des phénomènes simultanés et endogènes dans le réseau de transport (car l'utilisation de chaque mode influence celle des autres).

Outre sa vocation informative, cet état de l'art mettra en évidence les frontières des connaissances actuelles sur le sujet. Les lacunes relevées permettront ensuite de justifier l'originalité du projet.

Acquisition des données

Des données sur l'offre et la demande de l'ensemble des modes de transport disponibles à Montréal seront d'abord rassemblées pour plusieurs années. La demande sera notamment mesurée à l'aide de données passives et longitudinales. Cette acquisition de grande ampleur, rarement observée dans la littérature jusqu'à alors, sera possible grâce aux nombreuses collaborations de la Chaire Mobilité. Les données de comptages du MTMDET et de la Ville de Montréal seront exploitées pour évaluer l'utilisation de l'automobile privée et des modes actifs (vélo et marche), tandis que les transactions de cartes à puce collectées par la STM permettront de décrire l'utilisation du transport en commun (métro et bus). Le projet bénéficiera également des données GPS et/ou des données de courses provenant de différentes compagnies de taxi (Taxi Diamond et autres). En outre, des informations disponibles sous la forme de réservations de véhicules seront utilisées pour représenter l'autopartage basé station (Communauto), alors que des données transactionnelles seront analysées dans les cas de l'autopartage avec véhicules en libre-service (Car2go, Auto-mobile) et du vélopartage (BIXI).

Structuration intégrée des données

Les données ainsi recueillies seront nettoyées et validées séparément, puis les différentes bases seront intégrées et fusionnées dans une même structure de données. Cette étape impliquera le choix d'un cadre spatio-temporel commun qui dépendra de la couverture des données collectées mais aussi de l'offre disponible et de la demande observée. En effet, les interactions ne seront probablement détectables qu'à partir d'un certain niveau d'utilisation de l'ensemble des modes de transport. La zone d'étude sélectionnée devra donc être suffisamment dense en options de mobilité, et l'activité de ces options au cours de l'année devra également être considérée (sachant que les services de BIXI sont seulement offerts d'avril à novembre). Une zone possible d'étude pourrait être un groupement de plusieurs zones de voisinage autour des stations de vélopartage BIXI. Le rayon sélectionné autour de chaque station (défini par une certaine distance de marche) devra alors être déterminé à l'aide d'analyses de sensibilité. Par ailleurs, un indicateur d'usage commun sera construit et normalisé afin de caractériser l'utilisation de chaque mode de

transport. Le système d'information obtenu sera également enrichi avec des variables contextuelles (utilisation du sol, météo, calendrier, etc.). Toute cette procédure de traitement et de valorisation sera automatisée via un code informatique sur un logiciel de programmation comme R ou Python.

Identification, visualisation et mesure des interactions entre les modes

Une fois l'ensemble des données structuré, des analyses descriptives sur l'utilisation simultanée des différents modes de transport seront produites. Il s'agira ainsi de fournir un portrait complet et continu de la mobilité. Des vecteurs (ou des matrices) matérialisant la demande totale et multimodale seront créés au niveau systémique et hebdomadaire, puis ils seront segmentés en semaines types d'utilisation. Cette étape s'inscrira directement dans la suite des travaux de Morency et al. (2018) qui ont quant à eux présenté des jours types. Des indicateurs seront construits et des méthodes de fouille de données seront utilisées pour visualiser et mesurer des corrélations d'usage entre les modes. Des indices de complémentarité ou de compétitivité pourront notamment être développés afin de quantifier les interactions observées. La variabilité spatio-temporelle ainsi que l'influence de l'offre et de facteurs exogènes sur ces interactions et sur la répartition de la demande totale seront également évaluées. Pour ce faire, des séquences de semaines types seront analysées longitudinalement et spatialement. De plus, des arbres de décision ou d'autres modèles explicatifs seront créés afin d'identifier les facteurs décisifs dans la prévision de l'appartenance aux semaines types. Des tests statistiques (de significativité ou de taille d'effet) pourront également être appliqués en vue de faire ressortir les variables les plus importantes, tout en vérifiant leur caractère exogène ou endogène.

Modélisation

Les analyses précédentes aideront à déterminer les variables dépendantes et indépendantes à considérer dans le (ou les) modèle(s) développé(s). Plusieurs approches méthodologiques seront ensuite expérimentées afin de sélectionner celle qui sera la plus appropriée pour prévoir la demande de transport de manière multimodale et longitudinale. L'objectif sera de générer une demande totale répartie entre tous les modes et entre tous les jours de la semaine. Plusieurs intrants seront à prendre en compte et une procédure d'actualisation devra être développée afin de monitorer des changements dans le réseau et dans la population. Des modèles évolués seront requis afin de modéliser des phénomènes corrélés, interactifs et simultanés qui se produisent à plusieurs niveaux et dépendent de nombreuses variables (internes, externes et latentes). Entre autres, des modèles multi-niveaux, des modèles d'équations structurelles et/ou une combinaison de ces deux approches pourront être essayés. Des modèles plus complexes d'apprentissage machine pourraient également être étudiés : les modèles multi-agents se sont récemment démontrés particulièrement puissants pour simuler les modes partagés (Balac et al., 2015; Petrik et al., 2018). La demande totale pourra ainsi être prédite tout en tenant compte des corrélations d'usage, de l'évolution de l'offre et de la population, de la variabilité temporelle et individuelle des comportements, de la composante spatiale et de l'influence de facteurs exogènes. Toutefois, les modèles proposés devront être suffisamment compréhensibles pour pouvoir être mis en application. Cette contrainte facilitera le transfert des travaux réalisés vers les praticiens. Le (ou les) modèle(s) finalement obtenu(s) seront validé(s) et pourront être appliqué(s) à des cas pratiques (scénarios).

2.4.5 Résultats et contributions attendus

Au niveau analytique, les résultats de cette recherche permettront de qualifier et quantifier les interactions entre les modes de transport. Ils préciseront ainsi le rôle des différents modes de

transport dans l'évolution de la mobilité et ils mettront en évidence des situations de complémentarité ou de compétitivité. Ces interdépendances seront également expliquées par plusieurs variables endogènes et exogènes. Ce projet permettra alors d'identifier un ou des mode(s) substitut(s) en cas d'intempéries ou d'interruption du service. Aussi, des variations spatio-temporelles seront détectées dans les comportements multimodaux de mobilité et des nœuds intermodaux (potentiels ou observés) seront localisés.

Au niveau méthodologique, des procédures automatisées et systématiques de traitement et de valorisation de données seront mises à disposition. Des flux passifs et longitudinaux de données de grande taille seront maniés et cette recherche permettra de confirmer (ou d'infirmer) leur utilité en transport. Des prototypes d'analyse basés sur la combinaison originale et multidisciplinaire de différents outils scientifiques seront également créés ; ils feront notamment appel à des notions statistiques, informatiques et économétriques. Enfin, des indicateurs et un (ou des) modèle(s) de prévision de la demande multimodale (testés et validés) seront fournis.

L'originalité de ce projet résidera dans l'intégration d'une composante multimodale à l'analyse et à la modélisation des comportements de déplacement. Elle permettra de développer de nouvelles connaissances sur l'ensemble des modes de transport et leurs interactions. Dans cette perspective, elle stimulera une vision novatrice (multimodale et intégrée) de la mobilité des personnes. En outre, la méthodologie proposée reposera sur la combinaison innovante de différentes techniques (incluant des méthodes de fusion de données et des modèles statistiques avancés). Un changement de paradigme temporel sera également établi : les travaux produits s'éloigneront de l'idée caduque de jour moyen de semaine. En effet, ils prendront en compte la variabilité journalière de la demande en produisant d'abord des semaines typiques, puis en examinant leur évolution sur des périodes plus longues (un an ou plus). Multimodalité et longitudinalité seront donc deux concepts pionniers développés dans ce projet.

Par conséquent, cette recherche contribuera à améliorer la planification et la gestion du réseau de transport en le rendant plus intégré et donc plus compétitif, plus efficace, plus accessible et plus adapté aux besoins des usagers. Elle éclairera les prises de décision en permettant d'évaluer des stratégies globales pour l'ensemble des modes de transport et elle aidera à prévoir des changements dans les comportements à la suite d'une modification de l'offre ou de paramètres extérieurs. De plus, elle permettra d'inclure les modes émergents et alternatifs, moins polluants, aux processus de planification et d'assurer ainsi leur complémentarité avec les autres modes pour promouvoir la multimodalité et l'intermodalité. Finalement, la possible combinaison de certains modes de transport démontrera l'importance d'une plus grande collaboration entre les différents acteurs du transport ; elle les encouragera à travailler ensemble dans un but collectif de réduire la dépendance à l'automobile et d'assurer un développement durable de la mobilité.

2.5 Interactions entre les modes sous la perspective de l'usage du métro

- Par : Simon Lepage, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency
- Contexte : Chaire de recherche du Canada sur la Mobilité des personnes

2.5.1 Introduction

La planification optimale d'un réseau de transport nécessite de bien comprendre la demande en déplacement des usagers. Or, la demande demeure un phénomène complexe à prévoir étant donné qu'elle fluctue dans le temps et dans l'espace. En effet, la demande à court terme varie selon plusieurs facteurs tels que le jour de la semaine, la météo ou les événements. Une meilleure compréhension de la demande permet aux opérateurs des réseaux de transport d'ajuster plus finement l'offre de transport en fonction de la demande. L'optimisation du service permet d'offrir un meilleur service aux usagers sans nécessairement augmenter les coûts.

L'arrivée de nouveaux modes de transport tels que le vélopartage et l'autopartage complexifie les interactions entre les modes de transport et rend difficile leur prévision d'achalandage. Les modèles typiquement utilisés pour prévoir la demande en transport se basent généralement sur un jour moyen de semaine et traitent indépendamment chaque mode. Ces modèles négligent les modes de transport de faible achalandage, ne tiennent pas compte des corrélations d'usage entre les modes de transport, ni des facteurs externes pouvant influencer les décisions des usagers. Or, la disponibilité de flux continus de données permet maintenant d'observer et de modéliser cette variabilité d'usage pour les différents modes.

L'objectif général du projet est de mieux comprendre les corrélations d'usage entre les modes de transport à Montréal et d'identifier les variables exogènes ayant une influence sur cet usage. Une attention particulière est portée au métro, étant donné qu'il s'agit du mode avec la plus forte utilisation parmi les modes collectifs et partagés.

L'analyse présentée ci-dessous porte sur l'identification des variables exogènes décrivant le niveau d'usage journalier du métro. Deux différents modèles seront calibrés sur trois années de données puis comparés.

2.5.2 Revue de littérature

Plusieurs alternatives modales se présentent aux usagers afin de combler leurs besoins en mobilité. Chaque usager sélectionne un mode ou une combinaison de plusieurs modes selon ses objectifs de déplacement et ses contraintes personnelles. À l'échelle de l'usager, les principales variables déterminantes du choix modal dans le contexte Montréalais ont été identifiées par Martel Poliquin (2012). À l'échelle globale d'un mode de transport, les facteurs externes pouvant influencer la demande sont les caractéristiques de la population et du territoire, l'économie, les coûts et les conditions de déplacement (Ceder, 2007). Étant donné que la présente recherche s'intéresse à la demande à court terme, le facteur le plus déterminant est celui des conditions de déplacements puisqu'il a une influence immédiate sur la demande alors que les autres sont plus stables à court terme. Les conditions de déplacement peuvent être expliquées par la météorologie, par l'état des réseaux de transport et par la présence d'événements (Ceder, 2007).

Du côté de la météorologie, chaque mode est influencé différemment. Les modes lourds tels que le métro sont généralement moins affectés par la météo étant donné qu'ils sont séparés du trafic routier et qu'ils circulent habituellement sous terre (Guo, Wilson et Rahbee, 2007). Une analyse du système de métro de New York conclut que l'impact de la météo sur l'usage du métro est plus important la fin de semaine que la semaine, probablement étant donné que la majorité des

déplacements effectués la fin de semaine sont facultatifs (Singhal, Kamga et Yazici, 2014). Cette étude démontre une réduction de l'usage du métro lors de conditions météo défavorables telles que la présence de pluie, de neige ou de forts vents. Or, la présence de neige augmente l'usage du métro en période hors-pointe, ce qui semble indiquer un transfert modal vers le métro lors de conditions de déplacement atypiques (Singhal et al., 2014).

Par ailleurs, la demande varie selon certains cycles temporels, tels que les cycles journaliers, hebdomadaires ou annuels. Les cycles journaliers en semaine sont caractérisés par deux périodes de pointe prononcées, alors que les journées de fin de semaine ont un achalandage plus régulier. Les cycles hebdomadaires présentent une demande plus faible en semaine qu'en fin de semaine. Un cycle annuel est également causé par la variation des activités saisonnières (Singhal et al., 2014). Finalement, la demande est également affectée par les journées spéciales du calendrier telles que les congés fériés, les périodes de fête ou de vacances.

Différents modèles sont utilisés dans la littérature afin d'expliquer l'usage d'un mode de transport en fonction de différentes variables explicatives. Certaines recherches portent sur l'achalandage à l'échelle journalière alors que d'autres raffinent à une échelle horaire (Singhal et al., 2014). Certaines études analysent la variation du nombre de déplacements (Singhal et al., 2014) plutôt que la valeur brute du nombre de déplacements. Le type de données utilisé varie selon le mode ou la méthode de perception. Les données peuvent provenir par exemple de systèmes transactionnels (Mattson, 2008) ou de compteurs intelligent (Miranda-Moreno et Nosal, 2011). Par ailleurs, les chercheurs utilisent différentes formes de modèles, telles que la forme linéaire (Miranda-Moreno et Nosal, 2011), la forme Logit, Tobit (Sabir, 2011) ou des modèles pour séries temporelles (Gallop, Zhao et Tse, 2012). Le modèle ARIMA est un modèle additif pour séries temporelles populaire qui prend en compte des termes autorégressifs, la saisonnalité et auquel il est possible d'ajouter des variables explicatives (Hyndman et Athanasopoulos, 2018).

Bref, la présente analyse cherche à combiner les forces de ces différents modèles afin de développer un modèle adapté au contexte du métro de Montréal.

2.5.3 Données

La variable d'intérêt est le nombre d'embarquements dans le métro par jour. Ces données sont collectées par le système transactionnel de la Société de transport de Montréal (STM). Elles proviennent des validations de cartes à puce lors de l'entrée de chaque usager dans le réseau de métro. Cela signifie que la station d'embarquement est connue alors que celle de débarquement est inconnue. Les données utilisées pour cette analyse sont l'ensemble des embarquements agrégés par jour et par station, entre les années 2015 et 2017 inclusivement. Ces données sont présentées à la Figure 5. Des moyennes mobiles sur 4 semaines ont été ajoutées au graphique afin de mieux repérer les cycles et la tendance.

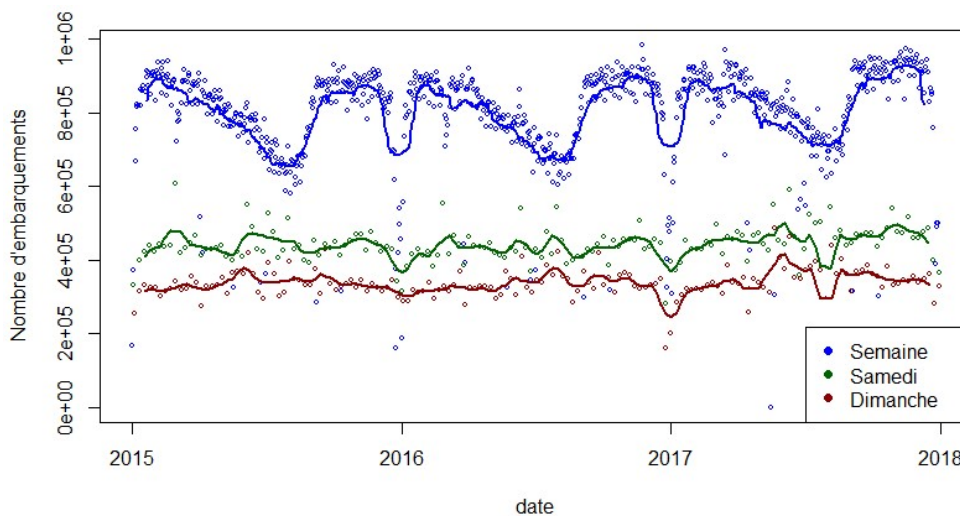


Figure 5. Nombre d'embarquements dans le métro selon le jour

Le nombre d'embarquements moyen en semaine est de 800 300 alors qu'il est de 390 600 la fin de semaine. Le nombre d'embarquements du samedi est supérieur au nombre d'embarquements du dimanche, alors qu'il est similaire durant les différents jours en semaine. Le nombre d'embarquements en semaine semble suivre des variations cycliques annuels, avec une baisse significative des embarquements en été et lors de la période des fêtes. Pour les jours de fin de semaine, le cycle annuel semble quasi inexistant.

Des variables explicatives temporelles sont utilisées afin d'expliquer les variations d'achalandage attribuables à différents jours ou périodes du calendrier. Ces variables permettent d'expliquer les cycles d'usage hebdomadaires et annuels. De plus, elles permettent d'identifier des périodes ou des jours spéciaux, comme par exemple les jours fériés durant lesquels une baisse de l'achalandage est attendue.

Les variables explicatives incluent également des variables météorologiques. Étant donné qu'il y a très peu de stations météorologiques sur l'île de Montréal, une seule station météorologique est choisie et l'hypothèse est posée que les conditions météo observées à cette station sont représentatives de l'ensemble du territoire de Montréal. La station météorologique choisie est celle la plus près du réseau de métro, soit celle située à l'aéroport Pierre-Elliott Trudeau. La station de métro la plus éloignée est la station Honoré-Beaugrand située à une distance de 21 km. Cette station météorologique mesure non seulement la température, l'humidité, la pression, les précipitations et le vent, mais fournit aussi une description qualitative des conditions extérieures.

2.5.4 Méthodologie

Les quatre étapes suivantes sont nécessaires afin de compléter cette analyse et sont détaillées dans cette section : le prétraitement des données, la sélection des variables, l'entraînement des modèles globaux et la comparaison des modèles.

La première étape, le prétraitement des données, a comme objectif de préparer la table des observations pour son analyse. Tout d'abord, les données sont filtrées selon leur cadre temporel afin de ne conserver que celles entre 2015 et 2017 inclusivement. Les données d'embarquements du métro sont agrégées en calculant la somme des embarquements pour chaque jour et station. Le nombre d'embarquements journaliers est normalisé par rapport au niveau d'usage moyen annuel, afin d'isoler l'effet des conditions météo de la fluctuation annuelle. Similairement,

certaines données météo horaires sont agrégées par jour en calculant des variables dérivées, telles que le nombre d'heures de pluie ou de verglas par jour. Quelques corrections manuelles sont apportées afin d'ajouter les données météo manquantes à partir d'une autre station météorologique à proximité. Ensuite, les données provenant de diverses sources sont fusionnées dans une table commune.

La seconde étape est la sélection des variables, dont l'objectif est de choisir les variables les plus pertinentes à inclure aux modèles. Pour ce faire, un corrélogramme est tracé, ainsi que des graphiques pour chaque variable explicative en fonction de la variable d'intérêt, afin d'identifier s'il y a présence de corrélation et par quelle fonction cette corrélation est la mieux représentée. Par exemple, certaines variables sont transformées par des fonctions à paliers. La sélection des variables est faite de manière automatique en utilisant la méthode pas-à-pas ascendante. Cette méthode crée un modèle linéaire dans lequel une variable est ajoutée à la fois, soit celle qui mène à la plus faible erreur moyenne quadratique. Le nombre de variable optimal à utiliser est déterminé par validation croisée en utilisant la méthode de validation croisée « 10-folds ». Ensuite, il est vérifié qu'il y a absence de colinéarité en s'assurant que la corrélation entre les variables explicatives est inférieure à 0,4. Le test du facteur d'inflation de la variance (VIF) est utilisé afin de détecter la présence de multicolinéarité. S'il y a présence de corrélation trop forte entre certaines variables, la variable la plus faiblement corrélée avec la variable à prédire est retirée, puis le processus de sélection des variables est recommencé.

La troisième étape consiste à entraîner les modèles. Quatre modèles sont entraînés, soit pour les quatre combinaisons possibles de deux types de modèles (linéaire et ARIMA) et de deux périodes d'analyse (semaine et fin de semaine). La saisonnalité hebdomadaire est prise en compte dans le modèle linéaire grâce à des variables binaires indiquant les jours de la semaine. Du côté du modèle ARIMA, la saisonnalité hebdomadaire est prise en compte automatiquement grâce aux coefficients autorégressifs. Pour les deux types de modèles, la saisonnalité annuelle en semaine est prise en compte par une variable explicative indiquant le niveau d'usage moyen de la période annuelle. Les coefficients des deux types de modèles peuvent être comparés étant donné qu'ils sont tous deux additifs.

La quatrième étape est la comparaison de la performance des formes de modèle linéaire et ARIMA, en utilisant la méthode de validation croisée de l'ensemble de validation. Afin de quantifier l'erreur de prédiction, les modèles sont entraînés sur le sous-ensemble des données d'entraînement comprenant les données des deux premières années. Les données de la dernière année sont mises de côté afin de valider le modèle. Ces sous-ensembles d'entraînement et de test sont sélectionnés sur des jours consécutifs plutôt qu'aléatoire étant donné que le modèle ARIMA nécessite toutes les données des jours antérieurs afin d'effectuer des prévisions. Le critère de sélection du meilleur type de modèle est l'erreur quadratique moyenne sur le sous-ensemble de données de test.

2.5.5 Résultats

La liste des variables sélectionnées par la méthode de sélection pas-à-pas ascendante est présentée au Tableau 1 pour le modèle linéaire en semaine. Ces variables explicatives sont groupées en deux catégories, à savoir les variables temporelles qui sont liées au calendrier et les variables météorologiques.

Tableau 1. Variables sélectionnées pour le modèle linéaire en semaine

	Variable explicative	Type	Description
Temporel	niveau_usage	numérique	Niveau d'usage moyen pour la période annuelle
	mardi	binaire	Identifie les mardis
	mercredi	binaire	Identifie les mercredis
	jeudi	binaire	Identifie les jeudis
	vendredi	binaire	Identifie les vendredis
	férié	binaire	Une variable pour identifier chaque jour férié
	férié_proximité	binaire	Jour férié dans la semaine en cours
	fêtes	binaire	Période des fêtes (entre le 24 déc. et le 2 janv.)
	relâche	binaire	Semaine de relâche principale d'hiver
Météorologique	tc_gratuit	binaire	Aucune perception à l'embarquement dû à la gratuité du transport en commun
	pluie	numérique	Quantité de pluie (mm)
	neige_faible	binaire	Présence de neige, entre 0.1 et 4 cm
	neige_élevée	binaire	Présence de neige, plus de 4 cm
	verglas	binaire	Présence de verglas
	vitesse_vent_max	numérique	Vitesse maximale des rafales (km/h) (la vitesse minimale enregistrée est de 30 km/h)

La variable `niveau_usage` représente le niveau d'usage annuel moyen. Cette variable est utile afin d'isoler l'impact des différentes variables explicatives des fluctuations annuelles normales présentées à la Figure 5. Une variable additive convient mieux au modèle qu'une variable multiplicative, sur la base de l'erreur quadratique moyenne de l'ensemble de données test. Cette variable est déterminée en utilisant le nombre d'embarquement pour chaque jour ouvrable des trois années de données, puis en calculant leur moyenne mobile sur 5 jours afin de réduire l'effet cyclique des 5 jours de la semaine. Ensuite, les trois années sont regroupées en une seule en faisant la moyenne des différents niveaux d'utilisation pour chacun des 365 jours. Ensuite, le lissage par splines cubiques est utilisé afin de réduire les irrégularités causées par des événements ponctuels.

La présence de neige a été segmentée en deux variables binaires étant donné qu'il semblait y avoir un seuil à 4 cm de neige à partir duquel le nombre d'embarquements chutait de façon importante.

Plusieurs variables n'ont pas été sélectionnées par la méthode de sélection, telles que la présence d'orage durant la journée, le nombre d'heures de pluie, la pression ou l'humidité relative. La différence de température et d'humidité par rapport à la moyenne se sont également avérées non significatives.

Pour les autres modèles, les variables explicatives sont très similaires à celles présentées au Tableau 1. Pour le modèle linéaire de fin de semaine, les variables binaires des jours de semaine sont remplacées par une variable binaire identifiant le dimanche. Du côté des modèles ARIMA, les variables des jours de la semaine sont retirées étant donné que ce type de modèle prend déjà en compte le cycle hebdomadaire grâce aux coefficients autorégressifs et de moyenne mobile.

Les coefficients résultants de la calibration des quatre modèles sur l'ensemble des trois années de données sont présentés au Tableau 2. Étant donné que la demande a été normalisée à 1, les coefficients indiquent la variation de la demande résultante sous forme d'une proportion. Par exemple, une variable binaire dont le coefficient est 0,05 indique une augmentation de 5% de la demande lorsque la variable est positive.

Tableau 2. Coefficients des différents modèles

	Période d'analyse	Semaine		Fin de semaine		
		Forme du modèle	Linéaire	ARIMA (3,0,2)(2,0,0) ₅	Linéaire	ARIMA (0,0,1)(1,0,0) ₂
Temporel	valeur initiale		0,0293		1,1658	
	niveau_usage		0,9449	0,7681		
	mardi		0,0624			
	mercredi		0,0655			
	jeudi		0,0877			
	vendredi		0,0674			
	dimanche				-0,2641	
	férié		-0,4993	-0,4868		
	férié_proximité_sem		-0,0268	-0,0171		
	férié_proximité_fds				-0,0518	-0,0594
	fêtes		-0,0655	-0,1728	-0,1941	-0,1844
	relâche		-0,1563	-0,1376		
	tc_gratuit		-1,0080	-0,9833	-1,0306	-1,0871
Météorologique	pluie		-0,0002	-0,0002	-0,0035	-0,0040
	neige_faible		0,0203	0,0087	-0,0507	-0,0394
	neige_élevée		0,0300	0,0111	-0,0693	-0,0426
	verglas		-0,0106	-0,0036	0,0159	0,0390
	vitesse_vent_max		-0,0003	0,0000	-0,0001	0,0001
Autorégressif	AR1			1,2354		
	AR2			-1,0469		
	AR3			0,1946		
	MA1			-0,7792		0,3071
	MA2			0,7783		
	SAR1			0,4393		-0,438
	SAR2			0,3850		-0,0862
SMA1					-0,8307	

Tout d'abord, les coefficients temporels sont discutés. Tel qu'attendu, la variable `niveau_usage` a un coefficient près de 1, ce qui implique que la saisonnalité annuelle en semaine est bien prise en compte. Par ailleurs, les coefficients pour tous les jours de la semaine sont positifs, ce qui signifie que leur usage est plus élevé que le jour de référence, soit le lundi. Le jeudi est le jour de la semaine avec la demande la plus forte, étant donné que son coefficient de 0,0877 est le plus élevé. Le coefficient du dimanche est négatif, ce qui indique que la demande est plus faible le dimanche que le samedi. Tel qu'attendu, la présence d'un jour férié diminue la demande du métro, soit d'environ 49%. De plus, la présence d'un jour férié à proximité réduit aussi le nombre d'embarquements. Similairement, la période des fêtes et celle de la relâche scolaire impliquent une diminution du nombre d'embarquement.

Ensuite, les coefficients météorologiques sont discutés. Tout d'abord, la pluie implique une légère diminution de l'usage du métro d'environ 0.02% par millimètre de pluie en semaine, et une diminution plus importante la fin de semaine de 0,4% par millimètre de pluie. La présence de neige augmente l'usage du métro en semaine alors qu'elle fait diminuer l'usage la fin de semaine. Une plus forte neige implique une plus grande variation de l'usage. Finalement, la présence de vent semble avoir un impact très minime sur l'usage, étant donné que les valeurs des coefficients sont presque nulles.

Les coefficients autorégressifs ne s'appliquent qu'au modèle ARIMA. Les coefficients nommés AR désignent des coefficients autorégressifs, soit basés sur des valeurs passées de la série temporelle. Les coefficients nommés MA désignent des moyennes mobiles, soit par la corrélation des termes d'erreur des valeurs passées. Les coefficients débutant par un S désignent des coefficients saisonniers, donc qui se réfèrent aux semaines précédentes. Le chiffre qui les accompagne désigne le décalage de la série. La meilleure combinaison de coefficients autorégressifs est déterminée par itération sur la base du plus faible critère d'information d'Akaike corrigé (AICC). Étant donné qu'il y a 3 coefficients AR pour le modèle de semaine, cela indique que l'usage des trois journées précédentes sont utiles à la prédiction. Similairement, les deux coefficients SAR indiquent que l'usage des deux semaines précédentes améliorent la prédiction. Pour le modèle de fin de semaine, le cycle hebdomadaire a un intervalle de 2 jours seulement, c'est pourquoi le décalage maximal pour les coefficients non-saisonniers est de 1 jour. L'usage du jour précédent ainsi que celui des 2 semaines précédentes semble améliorer la prévision.

Finalement, les coefficients des deux formes de modèles peuvent être comparés. Tout d'abord, les signes des coefficients des deux formes sont tous les mêmes, excepté pour la variable `vitesse_vent_max` dont les coefficients sont quasi-nuls. Globalement, les ordres de grandeur des coefficients des deux formes de modèles sont similaires. Une différence importante est présente pour les coefficients binaires indiquant la période des fêtes, avec un coefficient de -0,0655 pour le modèle linéaire et de -0,1728 pour le modèle ARIMA. Cette différence est fort possiblement attribuable au modèle ARIMA qui prend en compte la diminution de l'usage par des coefficients autorégressifs en plus de la variable binaire. Du côté des variables météorologiques, les coefficients pour la variable pluie sont similaires. L'effet de la neige semble plus important pour le modèle linéaire étant donné que ses coefficients sont plus élevés. Pour le verglas, le modèle linéaire produit un coefficient plus faible que pour le modèle ARIMA en semaine, alors que c'est l'inverse pour la fin de semaine. Bref, même si les coefficients des deux modèles sont différents, leurs ordres de grandeur et leurs signes sont similaires.

Afin d'identifier la meilleure forme entre la forme linéaire et le modèle ARIMA, les erreurs quadratiques moyennes associées à chaque modèle sont calculées par validation croisée sur les données d'entraînement et sur les données de test. Les résultats sont présentés au Tableau 3.

Tableau 3. Erreurs quadratiques moyennes des modèles

Type d'erreur	Période d'analyse	Linéaire	ARIMA
Erreur d'entraînement	Semaine	0,0346	0,0286
	Fin de semaine	0,0890	0,1007
Erreur test	Semaine	0,0406	0,0512
	Fin de semaine	0,1001	0,1243

Les erreurs sur les données d'entraînement sont similaires pour les deux formes de modèle. Pour la période en semaine, le modèle ARIMA présente une erreur légèrement plus faible, alors que pour la fin de semaine c'est le modèle linéaire qui a l'erreur la plus faible.

Or, le critère le plus important pour sélectionner la forme du modèle est l'erreur sur les données de test, étant donné qu'elle témoigne de leur capacité de prédiction. Pour la période de semaine, le modèle linéaire a l'erreur test la plus faible, soit de 0,0406 par rapport à 0,0512 pour le modèle ARIMA. Pour la période de fin de semaine, le modèle linéaire présente aussi l'erreur test la plus faible, soit de 0,1001 par rapport à 0,1243 pour le modèle ARIMA. Tel qu'attendu, l'erreur test est plus élevée que l'erreur d'entraînement pour chaque modèle.

Bref, le modèle linéaire est préférable au modèle ARIMA, selon le critère de l'erreur quadratique moyenne sur les données test de l'année 2017. Même si le modèle ARIMA est un modèle spécifiquement développé pour des séries temporelles, il ne semble pas s'appliquer aux données d'usage du métro aussi bien qu'un modèle linéaire. Le modèle ARIMA est un modèle plus flexible que le modèle linéaire, dû à son nombre plus élevé de coefficients possibles. Or, le modèle semble mener à du surapprentissage étant donné que le modèle performe moins bien sur le sous-ensemble de données de test. Par ailleurs, le modèle ARIMA tente de trouver des corrélations avec le niveau d'usage des jours précédents, alors que cette corrélation pourrait être très faible. En outre, le modèle ARIMA tente de corréliser le nombre d'embarquements avec celui mesuré une semaine ou deux avant, pour un même jour de semaine, alors qu'il est possible que les deux semaines précédentes ne soient pas représentatives du niveau d'usage. De son côté, le modèle linéaire utilise plutôt des variables binaires pour identifier chaque jour de la semaine, ce qui permet de pondérer l'usage selon le jour de la semaine en se basant sur l'ensemble des semaines plutôt que les 2 dernières semaines seulement.

Le modèle ARIMA présente plusieurs limitations. Une limitation du modèle est sa capacité de capturer une saisonnalité au maximum. De plus, la saisonnalité du modèle ARIMA doit être de durée fixe. Dans le contexte de données journalières, la présence d'une année bissextile est donc un problème pour ce modèle étant donné que le cycle est de 366 jours au lieu de 365 jours pour une année régulière. Par ailleurs, l'intervalle maximal de la saisonnalité est limitée dû à des capacités de calculs qui augmentent exponentiellement avec la taille de l'intervalle. Voici pourquoi plusieurs logiciels limitent l'intervalle maximal à 24. Des méthodes alternatives doivent donc être employées pour capturer des saisonnalités annuelles ayant un intervalle de 365 jours (Hyndman et Athanasopoulos, 2018). Voici pourquoi les cycles annuels sont pris en compte par une variable explicative dans le cadre de cette étude.

2.5.6 Conclusion

Le nombre d'embarquements journaliers dans le métro de Montréal peut être expliqué par plusieurs variables temporelles et météorologiques. Parmi les variables temporelles considérées, les jours de la semaine et les jours fériés semblent être déterminants. Par ailleurs, le cycle annuel d'usage en semaine est suffisamment important pour justifier l'ajout d'une variable explicative la décrivant. Or, l'usage la fin de semaine fluctue très peu dans l'année et ne nécessite donc pas de prise en compte du cycle. Les jours fériés et les périodes spéciales s'avèrent pertinentes pour expliquer le niveau d'usage. Du côté des variables explicatives météorologiques, les variables suivantes sont pertinentes : la quantité de pluie, la présence de neige et de verglas et la vitesse des rafales de vent.

Deux formes de modèles ont été considérées, soit la forme linéaire et le modèle ARIMA spécifique aux séries temporelles. Ces deux modèles additifs produisent des coefficients similaires pour chaque variable explicative. Par exemple, la présence de faible neige occasionne une augmentation de l'usage du métro en semaine de 1% à 2% selon le modèle et une diminution de l'usage la fin de semaine de 4% à 5%.

Les erreurs sur les données d'entraînement sont similaires pour les deux types de modèles. Or, l'erreur quadratique moyenne du modèle linéaire de 0,0406 en semaine est inférieure à celle du modèle ARIMA qui est de 0,0512. Il est donc possible de conclure que le modèle linéaire est plus approprié pour décrire l'usage journalier du métro. Le modèle ARIMA est plus flexible et semble mener à du surapprentissage.

Cette analyse pourrait être poursuivie afin d'obtenir d'autres informations sur l'usage du métro. Par exemple, des modèles différents pourraient être entraînés sur chaque station de métro de façon à comparer l'effet des variables explicatives de façon spatiale. Par ailleurs, l'usage du métro pourrait également être comparé sur différentes périodes horaires, telles que les périodes de pointe du matin et du soir. Ensuite, d'autres variables explicatives pourraient être ajoutées au modèle, telles qu'une variable indiquant la présence d'événements sociaux.

2.6 Le diagnostic de l'équité sociale des systèmes de transport

- Par : Charles Michaud, maîtrise
- Supervision : Pre Catherine Morency / Pre Geneviève Boisjoly
- Contexte : Chaire Mobilité

2.6.1 Introduction

L'accessibilité, définie globalement en tant que mesure cumulative des opportunités auxquelles a accès un individu (Bergeron, Canada et Human Resources and Skills Development Canada, 2004), s'est mutée depuis quelques temps en dimension centrale de la planification équitable des transports, tout à l'opposé des mesures d'économie de temps de parcours ou de mitigation de la congestion (Geurs et van Wee, 2004). La notion d'utilitarisme, longtemps le paradigme dominant dans la planification, cède lentement sa place dans la littérature à la notion d'accessibilité, ce dont témoigne l'émergence de mesures centrées non pas sur le niveau de service des infrastructures, mais plutôt sur les besoins des gens et l'accès aux opportunités. Dans le giron de l'équité, ces métriques, incontournables, s'articulent autour d'une segmentation de la population, visant à mettre en lumière les disparités affligeant certains sous-groupes en termes de mobilité (Di Ciommo et Shiftan, 2017; Litman, 2002; Lucas, 2012; Martens, 2016). Un diagnostic adéquat de la défavorisation en transport constitue toujours un défi majeur, l'évaluation de l'équité faisant intervenir diverses notions qualitatives souvent floues. Cela n'est pas étranger à la faible considération de cet enjeu au sein des cadres d'analyse (Litman, 2002). Pourtant, ce type de diagnostic est crucial au développement d'une offre de transport plus juste visant à fournir à l'ensemble des citoyens des perspectives de mobilité (Martens, 2016).

Le projet détaillé ici vise à évaluer la pertinence d'un cadre d'analyse tridimensionnel combinant des facteurs de vulnérabilité, des comportements de mobilité ainsi que des attributs issus de l'environnement urbain afin d'établir un diagnostic des problématiques de mobilité dans une perspective d'équité. La méthode mise de l'avant repose sur le développement de typologies de vulnérabilité et d'accessibilité sur la base d'attributs tirés de la littérature et qui se présenteront sous la forme d'échelles de progression au sein desquelles se positionnent les habitants de l'île de Montréal. Une fois ces échelles combinées au comportement de mobilité, d'intéressants constats émergent.

2.6.2 Revue de littérature

2.6.2.1 *Comprendre l'interaction entre vulnérabilité, accessibilité et mobilité*

L'évaluation conjointe de la vulnérabilité au transport, des comportements de mobilité ainsi que des attributs du quartier relève de la nécessité dans l'évaluation du niveau d'équité d'une offre de transport (Di Ciommo et Shiftan, 2017; Martens, 2016). À ce jour, cependant, peu d'études ont été menées dans l'idée précise de combiner ces trois éléments. Lucas et al. (2018) ont démontré un intérêt pour le domaine, voulant illustrer comment la considération de la distribution spatiale et sociale peut mener à l'ébauche de meilleures politiques de transport. Leur étude s'est penchée sur deux secteurs socialement défavorisés de Liverpool, en Angleterre, mais dont la densité locale d'opportunités et de services de transport collectif variait. Ils ont démontré que les populations du quartier jouissant d'une meilleure accessibilité effectuaient plus de déplacements et ce, en dépit d'un niveau de vulnérabilité comparable. Guidant à des conclusions similaires, une étude menée dans la région parisienne a conclu que les inégalités en milieu urbain sont moins contraignantes qu'en zones suburbaines en raison d'opportunités plus aisément accessibles à pied ou en transport collectif (Cornut et Madre, 2017).

2.6.2.2 La vulnérabilité en transport liée aux attributs individuels et du ménage

La vulnérabilité face aux systèmes de transport résulte d'une combinaison de facteurs. C'est une réalité multidimensionnelle, ce dont devrait tenir compte son évaluation; autrement dit, plus le nombre de facteurs de risque est grand, plus un individu est perçu comme désavantagé (Litman, 2002).

Parmi ces facteurs liés à des contraintes en termes de mobilité, l'âge occupe une place indéniable, puisque les jeunes et les personnes âgées présentent une plus grande vulnérabilité. Les premiers dépendent de accompagnements de leurs parents ou des transports collectifs jusqu'à 16 ans au minimum, tandis que les seconds connaissent des difficultés croissantes à se mouvoir à mesure qu'ils prennent de l'âge (Lucas, 2012). Les handicaps physiques et cognitifs constituent également des freins à la mobilité (Di Ciommo et Shiftan, 2017). Le fait d'avoir un enfant à charge vient aussi complexifier les déplacements quotidiens (Methipara, 2014), surtout dans le cas des familles dites monoparentales (Litman, 2002). C'est tout particulièrement vrai pour les femmes, qui tendent à se buter à un plus grand nombre de contraintes de mobilité que leurs homologues masculins. Elles ont en effet, en moyenne, un accès moindre à l'automobile lorsque celle-ci est partagée au sein d'un couple (Schwanen, Kwan et Ren, 2008) et elles ont l'habitude d'enchaîner les déplacements en raison de contraintes familiales contrairement aux hommes qui font plutôt des déplacements pendulaires directs (Lubitow, Rainer et Bassett, 2017). Ces enjeux font en sorte qu'il est valable de considérer le fait d'appartenir au sexe féminin comme facteur de vulnérabilité. Parmi les autres éléments pouvant se traduire par une mobilité réduite, mentionnons le fait d'être sans emploi ainsi que le statut de ménage à faible revenu (Grengs, 2010; Lucas, Philips, Mulley et Ma, 2018). Le fait de vivre dans un ménage sans voiture est un attribut qu'il importe aussi de considérer dans cette perspective (Currie et al., 2009). Cela s'explique par le développement urbain axé sur la desserte automobile qui a prédominé depuis l'après-guerre et qui a eu pour effet de complexifier la mobilité de ménages sans voiture (Di Ciommo et Shiftan, 2017).

2.6.2.3 La vulnérabilité en transport liée à l'accessibilité du quartier

Les caractéristiques du milieu de vie d'un ménage semblent avoir une influence déterminante sur le comportement de mobilité, si l'on se fie à la littérature (Ewing et Cervero, 2010; Meurs et Haaijer, 2001). C'est d'ailleurs ici la notion d'accessibilité qui est centrale, d'autant plus que dans une perspective de vulnérabilité en transport, il a été démontré que l'accessibilité avait une incidence positive sur les conditions économiques des populations vulnérables (Kenyon, Lyons et Rafferty, 2002; Lucas et al., 2018; Mattioli, 2014).

Une notion méritant une attention particulière est celle d'exclusion sociale. Certains l'ont défini en tant que processus contraignant qui a pour conséquence de limiter le niveau de participation d'individus à des activités perçues comme normales par le reste de la société (Preston et Rajé, 2007). Dans une optique de politique publique, le UK Social Exclusion Unit (2003) stipule qu'une connaissance plus fine des effets distributifs de ces politiques peut avoir un impact énorme sur le bien-être des populations vulnérables en cela qu'elles permettent de contourner les écueils responsables de l'exclusion sociale (Making the connections, 2003). L'exclusion sociale serait donc intimement liée au transport (van Wee, 2011). En effet, des lacunes dans l'offre de transport peuvent alimenter le processus et cela est d'autant plus vrai lorsqu'une tarification régressive empêche certains individus de jouir des réseaux. Une planification urbaine défailante peut également contribuer à l'exclusion sociale du fait de la création de milieux monofonctionnels fournissant un accès insuffisant aux opportunités.

Dans une étude comparative des niveaux d'accessibilité de différents segments de population à Bogotà, des chercheurs ont identifié une corrélation entre un faible niveau de desserte en

transport collectif dans certaines régions et une défavorisation économique accrue (Bocarejo S. et Oviedo H., 2012). D'ailleurs, l'accès à certaines opportunités de base à distance de marche est crucial, les premiers gains d'accessibilité étant les plus significatifs (Currie et al., 2009). Cela est notamment vrai pour l'emploi, dont la contribution à l'intégration sociale est reconnue, d'autant plus que les programmes de lutte à la pauvreté sont aujourd'hui souvent axés sur l'accès à l'emploi. Plusieurs études tendent cependant à démontrer que le transport constitue un frein important à l'employabilité, ce constat étant exacerbé chez les bénéficiaires d'assistance sociale (Blumenberg et Manville, 2004).

2.6.3 Méthodologie

2.6.3.1 Source de données

La source de données primaire utilisée dans le cadre de ce projet est la version 2013 de l'Enquête Origine-Destination montréalaise. Ce jeu de données contient des informations pertinentes pour l'établissement d'un portrait de mobilité des individus et l'analyse de leur vulnérabilité sur la base d'attributs personnels ou liés au ménage. Dans une perspective exploratoire, seules les données relatives à l'agglomération de Montréal ont été employées. De manière complémentaire, des jeux de données *GTFIS* ont permis d'établir la densité de service de transport collectif dans le voisinage des ménages. Les opportunités géolocalisées de *CanMap* ont par ailleurs servi au développement d'attributs d'accessibilité locale.

2.6.3.2 Définir un cadre d'évaluation tridimensionnel

L'objectif de ce projet de recherche étant d'identifier des corrélations entre la vulnérabilité d'un individu face au système de transport, les attributs de son voisinage et ses habitudes de mobilité, il devient dès lors hautement pertinent de développer un outil d'analyse tridimensionnel reposant sur l'interaction de trois typologies (vulnérabilité, mobilité, voisinage). La résultante, qui peut être conceptualisée comme un cube 3D, contiendra l'ensemble de la population du territoire d'étude segmentée en fonction de son positionnement au sein de chacune des trois typologies.

2.6.3.2.1 Vulnérabilité face au transport

Comme mentionné précédemment, plus un individu est sujet à des facteurs de risque en matière de transport, plus ce dernier peut être perçu comme vulnérable (Litman, 2002). Sur cette base, il fut décidé de mettre au point une échelle de vulnérabilité en transport reposant sur les attributs associés à cette vulnérabilité dans la littérature. La présence d'un de ces facteurs se traduit par l'ajout d'une unité au pointage d'un individu, sauf pour certains attributs moins contraignants qui sont associés à un bond d'un demi-point.

Le fait d'être âgé de 16 ans et moins ou de 65 ans et plus est l'un de ces facteurs de vulnérabilité (1 point), tout comme le fait d'être de sexe féminin (1 point). Certains attributs personnels sont dérivés de caractéristiques propres au ménage, certaines manipulations étant alors nécessaires. Le statut de parent, du fait de la complexité additionnelle dans la gestion des déplacements, est associé à une vulnérabilité conditionnelle à l'âge des enfants (0-5 ans : 1.5 point, 6-12 ans : 1 point, 13-17 ans : 0.5 point). Dans une optique de simplification des calculs, seule la présence d'au moins un enfant par tranche d'âge a été considérée. La monoparentalité (1 point) est un autre facteur de vulnérabilité, comme l'est aussi le statut de faible revenu (1 point). Quant au statut du ménage relativement à la motorisation, le fait de vivre dans un ménage sans voiture (1 point) n'était pas jugé aussi pénalisant que le fait de jouir d'un accès partiel (0.5 point) dans le calcul du pointage.

De cette manière, chaque individu s'est vu attribuer un pointage de vulnérabilité compris entre 0 (absence totale de facteurs de risque) à 8 (tous les facteurs combinés). Ce pointage fut par la suite

associé à une catégorie de la manière suivante : V1 (0 point), V2 ([0,1] point), V3 ([1,2] points) et ainsi de suite. Le score le plus élevé frôlant 5.5 points, il existe au total sept segments (V1 à V7).

2.6.3.2.2 Comportement de mobilité

Pour cette typologie, par suite d'une expérimentation en *R* avec l'algorithme des *k-moyennes*, il a été décidé d'opérer la segmentation des individus uniquement en fonction des modes de transport employés au cours de la journée de l'enquête. Divers attributs ont tout de même été calculés afin de mieux comprendre les implications du choix modal sur le portrait de mobilité de la population.

Un premier attribut (*mobile*) est une variable de type booléen qui se voit assigner la valeur de 1 si l'individu a effectué au moins un déplacement au cours de la journée. L'utilisation d'une voiture (*auto*) ou du transport collectif (*TC*) dans un moins un déplacement a également fait l'objet de variables distinctes, tout comme la présence de déplacements impliquant plusieurs modes. À la suite de diverses manipulations, il fut ensuite possible d'établir le ou les modes habituels d'un individu. Parmi les autres variables mesurées dans le but de mieux appréhender les implications du choix modal, mentionnons la distance totale (*kmtot*), la distance maximale au domicile à vol d'oiseau (*max_dist*) ainsi que le taux de mobilité (*taux_mob*).

2.6.3.2.3 Accessibilité locale

Cette typologie vise à broser un portrait de l'accessibilité du voisinage immédiat d'un ménage. Pour ce faire, des points furent fixés à 800 mètres de chaque domicile (via distance réseau) avant d'être reliés entre eux pour former une enveloppe convexe, laquelle servirait à effectuer une série d'intersections spatiales visant à créer des attributs liés à la densité du voisinage.

Seulement quelques variables furent considérées dans un premier temps, soit celles qui, eu égard à la revue littéraire, semblent affecter le plus significativement les populations vulnérables. Ainsi, la densité d'emplois accessibles à distance de marche fut établie pour chaque ménage, de telles opportunités étant particulièrement importantes pour des individus sans emploi. La densité d'opportunités en matière de commerces et de services a également été calculée, qu'il s'agisse de lieux associés à des besoins primaires ou à des loisirs. Le troisième attribut calculé pour cette typologie fut la densité du service de transport collectif, sur la base du nombre de passages-arrêts accessibles quotidiennement à 800 mètres (automne, semaine). Étant donné que ces trois attributs traitent d'aspects bien différents, il fut décidé de leur attribuer un poids équivalent dans la construction de la typologie. Comme pour la vulnérabilité personnelle au transport, le choix d'une échelle progressive fut mis de l'avant. Pour chacun des trois attributs, un score *Z* fut calculé basé sur le 95^e percentile, le pointage final oscillant alors entre 0 (accessibilité nulle) et 3 (accessibilité optimale). La dernière étape consista en la segmentation des individus en cinq groupes selon leur quintile d'accessibilité (A1 : densité très faible, A5 : densité optimale).

2.6.4 Résultats

2.6.4.1 Échelle de vulnérabilité

En vertu des attributs considérés dans la construction de cette typologie, une grande majorité des individus n'affiche qu'une vulnérabilité faible face aux systèmes de transport. En effet, plus des deux tiers de la population (68,1%) se retrouve parmi les trois échelons du bas (V1 à V3), tandis que seuls 7,5% des individus se retrouvent parmi les trois échelons du haut (V5 à V7). Par ailleurs, moins d'un pourcent de la population obtient un score de vulnérabilité supérieur à quatre points.

Tableau 4. Échelle de vulnérabilité et représentation des attributs

Segment de vulnérabilité	Pointage	% du total	femme	<16 ans	>65 ans	parent	mono-parentalité	sans auto	faible revenu
V1	0	7,54%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
V2	]0,1]	24,33%	26%	0%	9%	12%	0%	23%	5%
V3	]1,2]	36,26%	50%	18%	13%	22%	0%	47%	16%
V4	]2,3]	24,40%	82%	33%	22%	28%	1%	66%	38%
V5	]3,4]	6,77%	96%	25%	35%	41%	5%	80%	83%
V6	]4,5]	0,65%	99%	0%	7%	99%	33%	92%	87%
V7	]5,6]	0,04%	100%	0%	21%	100%	82%	97%	100%
TOTAL		100,00%	52%	16%	14%	21%	1%	45%	22%

Une progression de certains attributs est observable en progressant sur l'échelle de vulnérabilité (Figure 6). Toute chose étant égale par ailleurs, l'attribut sous analyse étant retiré tour à tour du calcul du pointage, la part de femmes tend à croître à mesure que l'on progresse sur l'échelle. Un portrait similaire est identifiable pour les individus à faible revenu et les familles monoparentales. Cependant, la part d'individus sans voiture n'affiche aucune tendance au travers des pointages.

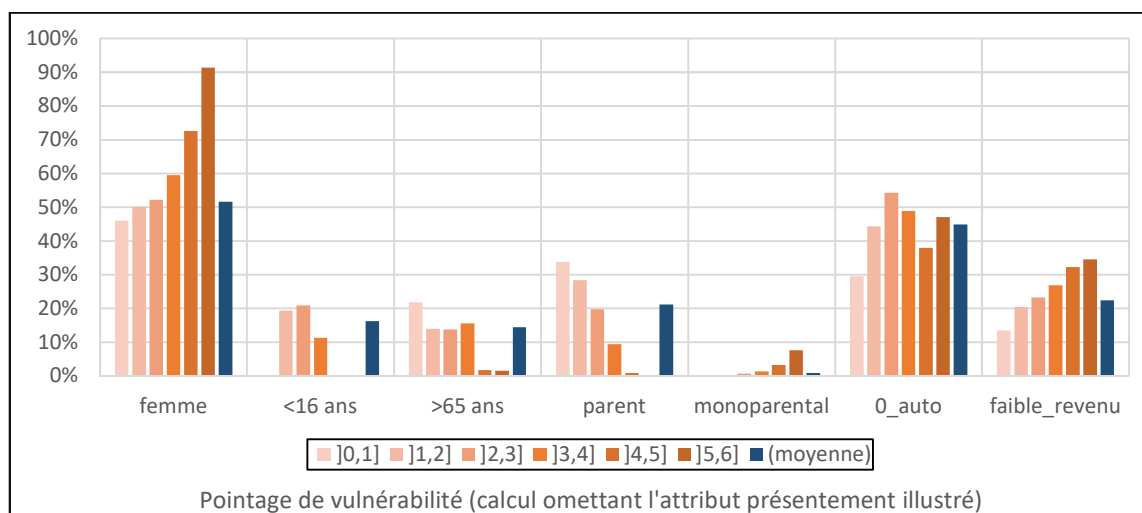


Figure 6. Progression des attributs le long de l'échelle de vulnérabilité

La vulnérabilité n'est pas distribuée de façon uniforme sur l'ensemble de l'île de Montréal (Figure 7). Ainsi, les individus peu vulnérables affichent des concentrations élevées dans les environs du centre-ville ainsi que dans l'ouest de l'île, tandis que la forte vulnérabilité est plutôt corrélée avec le nord-est de l'île, d'autres poches de défavorisation étant cependant identifiables ailleurs.

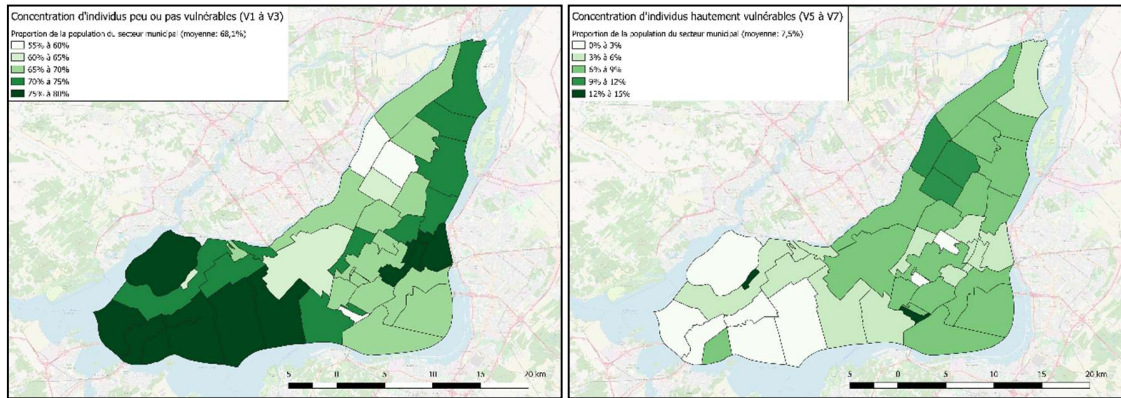


Figure 7. Concentration d'individus non vulnérables (V1 à V3, gauche) et hautement vulnérables (V5 à V7, droite)

2.6.4.2 Segments de mobilité

La segmentation des individus basée sur le mode de déplacement a mené à l'identification de cinq groupes, soit les personnes ne dépendant que de la voiture (37%), celles basant leur mobilité sur le transport collectif uniquement (20%), mais aussi les personnes combinant divers modes durant leur journée (multimodaux, 15%), celles faisant usage de modes actifs seulement (11%) et aussi les individus non mobiles (17%) (Figure 8).

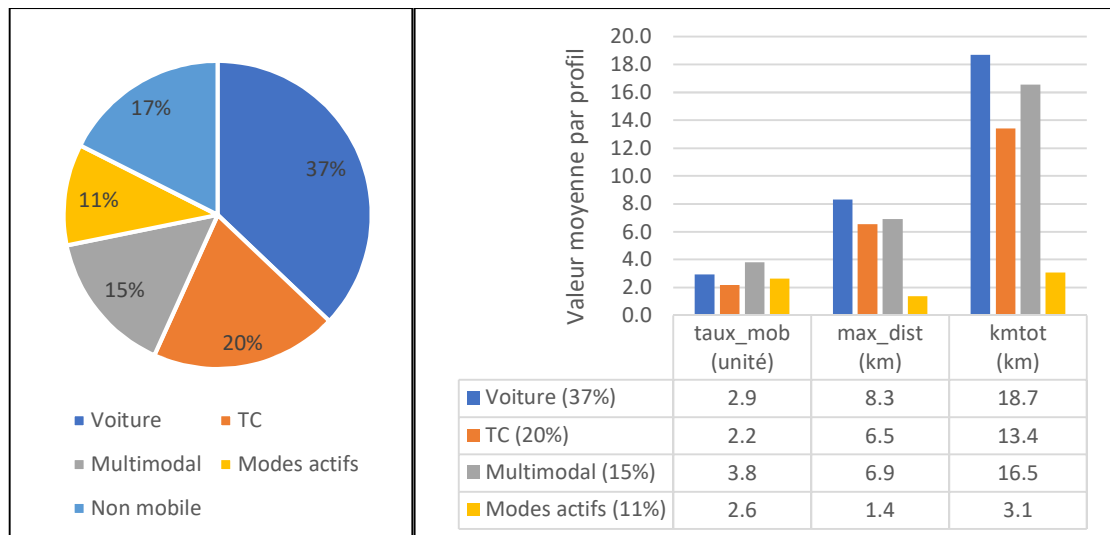


Figure 8. Poids de chaque comportement (gauche) et attributs reliées (droite)

Le profil modal aide à mieux apprécier d'autres attributs de mobilité. Ainsi, les automobilistes se démarquent par la distance maximale au domicile ainsi que par le kilométrage total parcouru en une journée, tandis que c'est chez les individus multimodaux que le taux de mobilité est le plus élevé, atteignant une valeur proche de 4 déplacements. Les utilisateurs du TC affichent quant à eux la plus petite valeur à ce chapitre, tandis que leur kilométrage quotidien les distingue des usagers de la voiture et des individus multimodaux. Les personnes se déplaçant de manière active font preuve d'un taux de mobilité proche de celui des automobilistes, mais leurs données liées au kilométrage ainsi qu'à la distance maximale au domicile sont bien en deçà de celles relatives aux autres profils de mobilité.

La visualisation permet d'appréhender la répartition spatiale des groupes de mobilité (Figure 9). Les résultats font état d'une corrélation spatiale entre les quartiers centraux et l'usage du

transport collectif, des modes actifs et le profil multimodal. À l'inverse, les automobilistes sont fortement surreprésentés aux extrémités du territoire, surtout dans l'ouest de l'île, tandis que les individus non-mobiles sont fortement concentrés dans la portion nord-est de la ville.

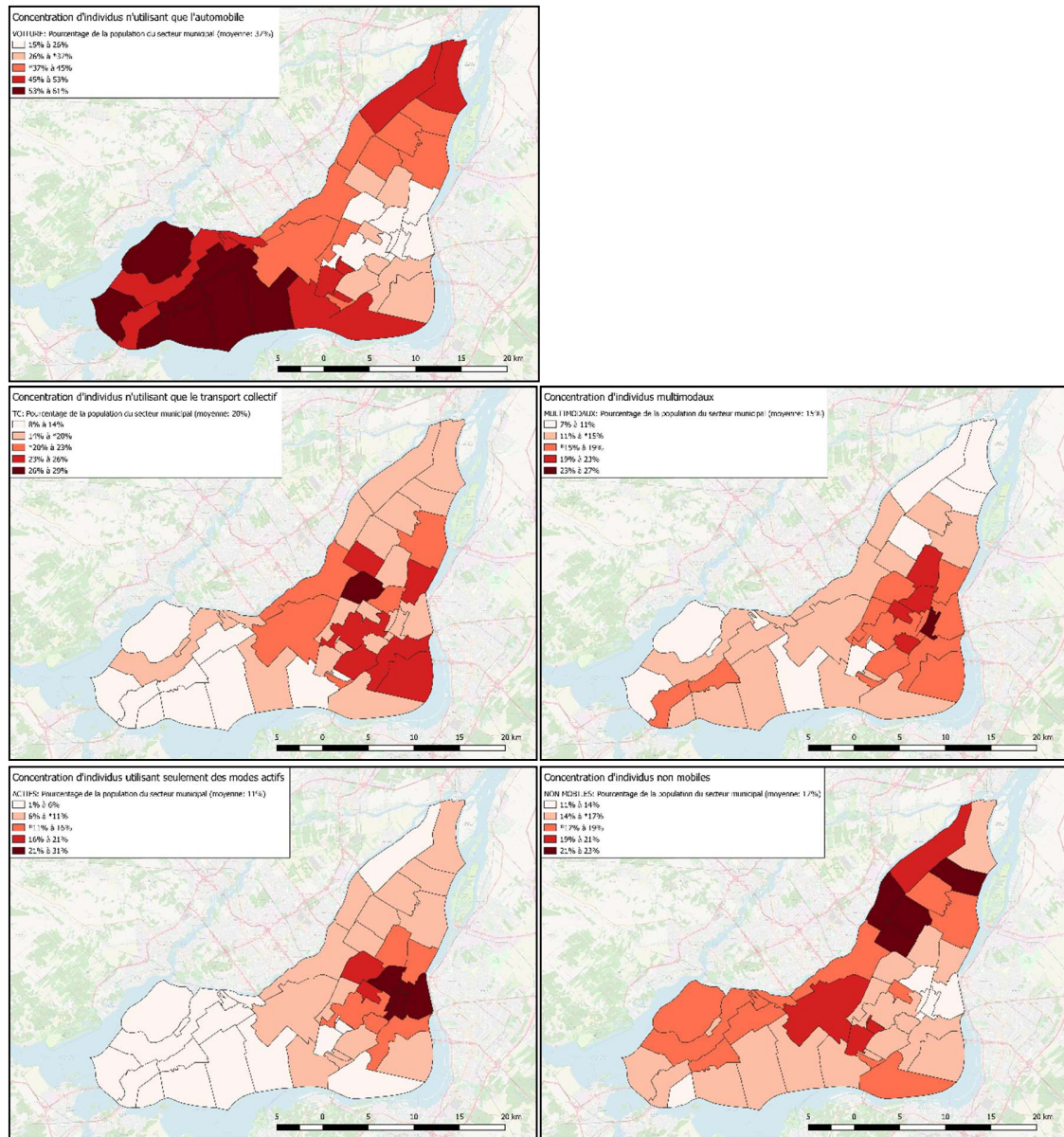


Figure 9. Poids des profils de mobilité par secteur municipal : automobilistes (tout en haut, droite), usagers du TC (haut, gauche), individus multimodaux (haut, droite), individus actifs (bas, gauche) et gens non mobiles (bas, droite)

2.6.4.3 Échelle d'accessibilité locale

Le calcul d'un indice d'accessibilité locale reposant sur l'accès à l'emploi, aux services et à l'offre de transport collectif a permis de constater que cette accessibilité est très inégalement répartie spatialement, les deux quintiles inférieurs (A1 et A2) rassemblant 85% de la population, tandis que les deux quintiles jouissant d'une grande accessibilité (A4 et A5) ne représentent que 5% des individus de l'agglomération (Tableau 5).

Tableau 5. Distribution de la population entre les quintiles d'accessibilité

Quintile	Pointage d'accessibilité	Population	Proportion
A1	[0-0.6]	699 292	39,6%
A2	]0.6-1.2]	816 578	46,3%
A3	]1.2-1.8]	156 632	8,9%
A4	]1.8-2.4]	54 448	3,1%
A5	]2.4-3.0]	38 572	2,2%
Total	-	1 765 522	100,0%

Par ailleurs, cette répartition inégale de la population entre quintiles répond à une logique spatiale particulière (Figure 10). Sans surprise, le centre-ville bénéficie du meilleur niveau d'accessibilité, secondé par les zones situées à sa périphérie. Il est possible de constater que plusieurs stations de métro sont associées à des environnements bénéficiant d'une accessibilité relativement élevée (en jaune). À l'inverse, les extrémités du territoire, surtout la moitié ouest de l'île, se caractérisent par des niveaux d'accessibilité faible voir médiocre.

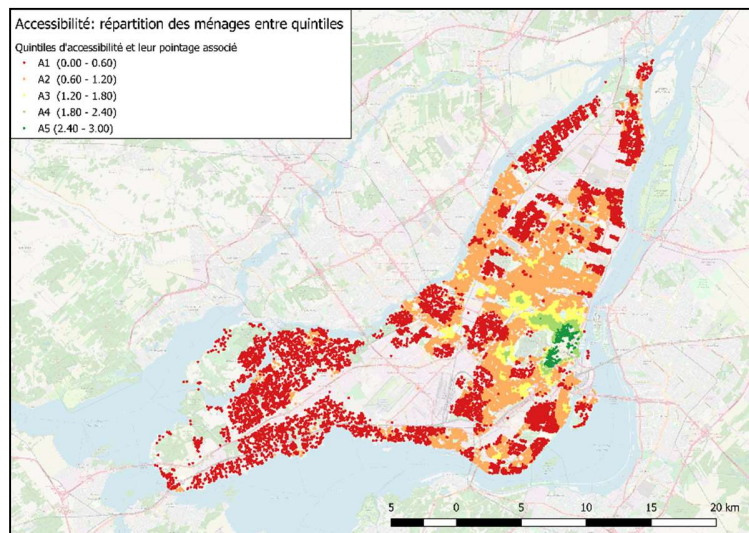


Figure 10. Distribution de l'accessibilité sur le territoire montréalais

2.6.4.4 Cadre d'analyse tridimensionnel

La combinaison des trois typologies au sein d'un seul et unique cadre d'analyse revêt un défi de taille en termes d'interprétabilité des données. Pour ce faire, la carte proportionnelle (en anglais : *treemap*) s'est avérée être particulièrement utile (Figure 11), quoiqu'une assistance soit utile pour être en mesure d'y extraire des constats. Il s'agit d'une représentation misant sur une imbrication des trois typologies, celles-ci répondant à une hiérarchie. Dans le cas présent, c'est l'accessibilité qui constitue le niveau de découpage primaire. Il est ainsi possible de se référer aux cinq quintiles d'accessibilité, dont la taille est proportionnelle au nombre d'individus représentés (quoique les quintiles A3 à A5 aient été agrandis par un facteur 3 à des fins de visualisation). Le second niveau de découpage se rapporte au profil de mobilité, tandis que la dernière segmentation repose sur le niveau de vulnérabilité. La taille de chaque case dépend alors du poids relatif de chaque trio et la teinte révèle l'écart entre la valeur observée et une valeur prédite en fonction d'une répartition aléatoire des attributs, faisant ainsi ressortir des corrélations intéressantes entre typologies.

De manière générale, les automobilistes sont surreprésentés dans le quintile A1, tandis que leur proportion diminue à mesure que l'environnement se densifie, au profit des comportements liés aux modes collectifs et actifs ainsi que multimodaux. Les modes actifs sont fortement représentés au sein des milieux les plus denses, alors que c'est plutôt l'inverse pour les automobilistes et les individus non mobiles. La portée analytique de cette carte proportionnelle est indéniable.

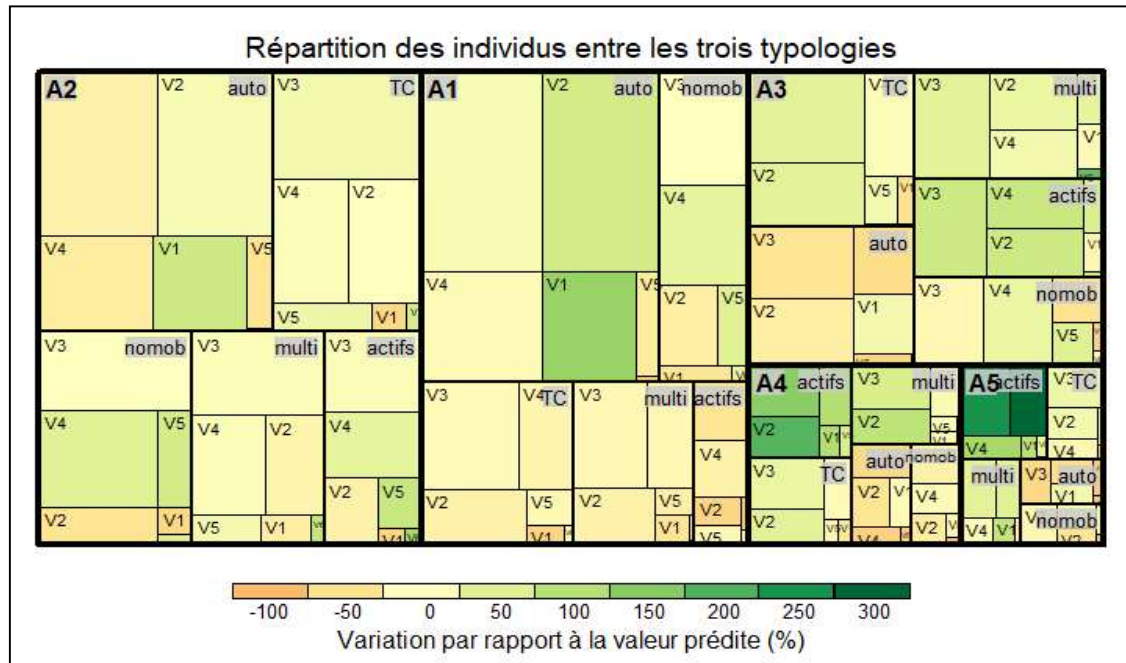


Figure 11. Carte proportionnelle de la distribution de la population entre les trois typologies

2.6.4.5 Interactions entre vulnérabilité, accessibilité et mobilité

Le fait de combiner la vulnérabilité, la densité du voisinage et les habitudes de mobilité fournit un angle d'analyse inédit. Il est par exemple possible d'apprécier la variation des comportements de mobilité entre segments de population peu vulnérables (V1 à V3) et hautement vulnérables (V5 à V7) à travers les quintiles d'accessibilité (Figure 12). Certaines constantes demeurent cependant, peu importe le niveau de vulnérabilité. Ainsi, à mesure que la densité du voisinage croît, la part modale de l'automobile chute de manière importante, compensée surtout par la croissance des modes actifs mais aussi, dans une moindre mesure, par une présence accrue du transport collectif et de la multimodalité.

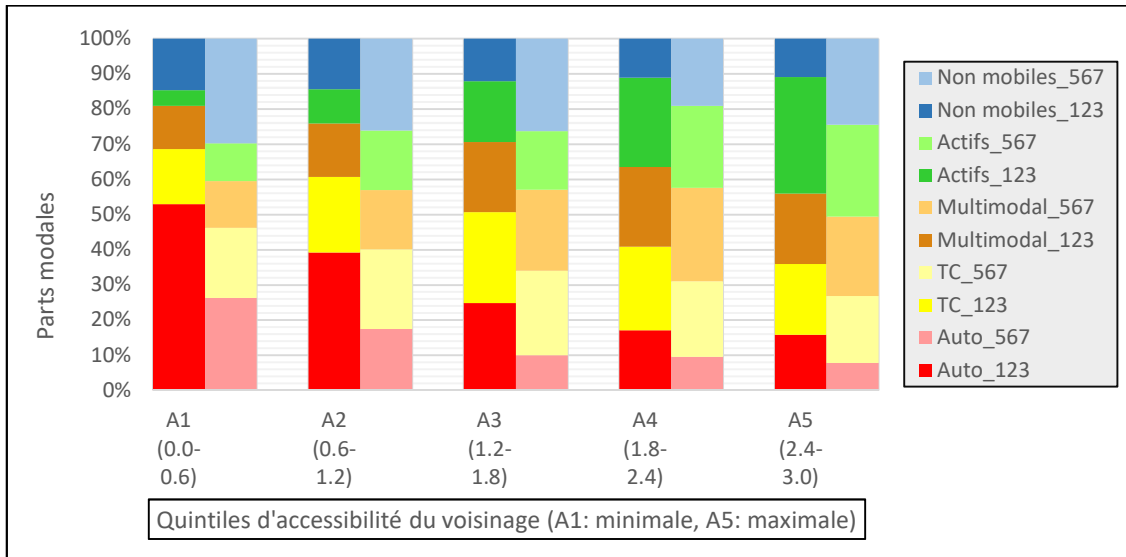


Figure 12. Variations de parts modales entre segments de population et quintiles d'accessibilité

Bien que ces tendances générales soient hautement pertinentes, c'est surtout la comparaison des profils de mobilité entre segments de vulnérabilité (V1-V3 contre V5-V7) qui entraîne les constats les plus évocateurs. La proportion d'individus dont la mobilité repose uniquement sur la voiture est ainsi automatiquement deux fois plus petite chez les personnes vulnérables, ce qui témoigne en soi du fardeau que représente l'automobile pour ces personnes. Cette différence très marquée est grandement compensée par la part d'individus non mobiles, qui est nettement plus prononcée chez les segments vulnérables. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cet écart d'utilisation de la voiture n'est pratiquement pas compensé par le transport collectif ou la multimodalité, les proportions associées à ces profils de mobilité étant relativement semblables entre les segments vulnérables et non vulnérables. Par ailleurs, une observation est digne de mention relativement aux modes actifs, le recours à ces derniers étant bien plus fréquent chez les individus vulnérables dans les milieux caractérisés par une très faible accessibilité, tandis que ce sont les personnes non vulnérables qui pratiquent davantage la mobilité active dans les milieux très denses.

2.6.5 Conclusion

La littérature traite souvent des interactions entre l'environnement urbain et le comportement de mobilité, mais peu de chercheurs se sont jusqu'ici penchés sur l'apport de la vulnérabilité à ces dynamiques. Ce projet, qui repose sur la définition d'un outil de diagnostic tridimensionnel, jette un regard nouveau sur ces interactions, dont la compréhension est cruciale à l'intégration de la notion d'équité au sein des outils de planification.

De manière générale, la méthode permet de comprendre les déterminants environnementaux et sociaux du choix modal dans une perspective spatialisée, tout en facilitant l'identification de zones peu accessibles au sein desquelles les populations vulnérables sont surreprésentées. Cela peut faciliter la priorisation des zones qui bénéficieraient grandement d'une amélioration de l'offre de transport collectif, d'une refonte tarifaire à saveur sociale ou encore d'un bassin mieux garni de services de proximité, entre autres choses.

Parmi les constats issus de cette analyse, il importe de mentionner la proportion significativement plus élevée d'individus non mobiles parmi les segments vulnérables, qui va du simple au double. C'est à se demander si les personnes plus à risque font le choix conscient de moins se déplacer ou bien si cela est le fruit de facteurs limitatifs. Par ailleurs, l'écart majeur au chapitre de l'utilisation

de l'automobile ne semble pas compensé outre mesure par un recours accru au transport collectif ou à la multimodalité chez les individus vulnérables, ce qui entre en conflit avec l'idée reçue selon laquelle les services de transport en commun bénéficieraient avant tout aux personnes pauvres. Ainsi, il est possible d'émettre l'hypothèse que le transport collectif ne parvient pas, dans l'état actuel des choses, à mitiger les inégalités sociales.

2.7 Développement d'indicateurs de durabilité pour le transport collectif

- Par: Judith Mageau-Béland, maîtrise
- Supervision: Pre Catherine Morency
- Contexte: Chaire Mobilité

2.7.1 Introduction

Dans un contexte où la mobilité durable est largement discutée, autant dans le discours public que scientifique, la quantification de celle-ci, en plus des différentes externalités, est toujours difficilement opérationnelle. La création d'indicateurs permet non seulement la description de la durabilité d'un système, mais également la comparaison de scénarios sur une base équivalente. Dans ce projet, on se concentre spécifiquement sur le transport collectif, pour des fins de simplification des indicateurs et en raison de la qualité des données disponibles. La littérature regorge de proposition de modèles d'indicateurs ou d'index de durabilité. Le travail de la recherche est donc d'évaluer leur pertinence, leur équilibre et, le cas échéant, leur applicabilité au transport en commun. Pour y arriver, une vaste revue de littérature est effectuée tout d'abord sur les indicateurs de mobilité durable et de durabilité en général, puis pour chacun des indicateurs, se concentrant principalement sur les méthodes de mesure. Cette étape permet de construire un cadre méthodologique pour l'évaluation de l'indicateur sur un scénario de développement ou de modification du service de transport en commun, tout en conservant la possibilité de modifier l'échelle d'application (d'un arrêt à une ligne, par exemple). Enfin, certains de ces indicateurs sont explorés davantage en les appliquant dans un contexte réel.

2.7.2 Indicateurs de durabilité en transport

Divers indicateurs ou systèmes d'indicateurs sont proposés dans la littérature pour mesurer le développement durable sur les systèmes de transport ou sur une ville. Lorsqu'il s'agit du second cas, on note l'importance de l'impact du transport sur l'ensemble de la ville (Moles, Foley, Morrissey, & O'Regan, 2008). Toutes les études s'entendent tout de même sur les aspects à mesurer qui composent la définition classique du développement durable : économie, société et environnement (Brundtland, 1987). Certains amènent également la notion de gouvernance dans l'évaluation de la durabilité (Litman, 2005).

Une grande quantité d'études propose des systèmes d'indicateurs basés sur la disponibilité des données (Haghshenas & Vaziri, 2012; Moles et al., 2008; Nicolas, Pochet, & Poimboeuf, 2003). Néanmoins, bien qu'il s'agisse d'une contrainte importante d'opérationnalisation, il est difficile d'obtenir un portrait juste de la durabilité en tenant compte uniquement des données disponibles, puisque certains aspects ne sont pas mesurables directement, mais doivent tout de même faire partie intégrante de l'évaluation.

D'autres études effectuent une revue des développements sur le sujet afin de regrouper les indicateurs déjà formulés et sélectionner les plus pertinents. Parmi celles-ci, certaines vont choisir de former leur système à partir des indicateurs les plus mentionnés (Tanguay, Rajaonson, Lefebvre, & Lanoie, 2010). D'autres vont plus établir des critères de pertinences sur les indicateurs existants, dont la disponibilité des données, tel que mentionné précédemment, ou encore les objectifs de planification (Litman, 2005). Cette sélection peut s'avérer un choix arbitraire et influencer subjectivement les résultats de l'analyse de durabilité.

Enfin, l'agrégation en un index composite est également un élément couramment soulevé dans la littérature. Certains vont choisir de développer une méthodologie d'agrégation et de pondération des indicateurs, alors que d'autres ont choisi de ne pas combiner les indicateurs. En effet, les deux méthodes peuvent être pertinentes, mais l'agrégation en un index numérique peut

entraîner une perte de détails importante. Une agrégation visuelle de l'information peut être plus adéquate pour la présente recherche.

2.7.3 La Pieuvre et le Cercle de causalité

La Pieuvre constitue le schéma relationnel au cœur des travaux de Sioui (2014). Celle-ci représente tous les éléments composant la durabilité mis en relation. Le Cercle de causalité est tiré des mêmes travaux, mais il se penche davantage sur les relations de causes à effets entre les composantes de la durabilité dans un contexte de mobilité. Ces représentations sont le reflet d'une réflexion approfondie de mesure, de pondération et d'équilibre des éléments constituant le développement durable. Cette synthétisation est également accompagnée d'un système d'indicateurs de développement durable en transport, tentant une application à des modes et des systèmes de transport.

Il s'agit donc du modèle choisi pour réaliser la suite des travaux. La grande qualité de la réflexion, de l'équilibre des indicateurs le différencie des autres travaux. Tel que mentionné par Tanguay et al. (2010) dans le cas des villes, la difficulté d'établir une définition claire du développement durable, la difficulté à classer les indicateurs ainsi que la faible disponibilité des données rendent difficile l'évaluation adéquate de la durabilité. De plus, la nature subjective des systèmes retrouvés dans la littérature nuit à la précision des indicateurs. Néanmoins, Sioui réussit à répondre en grande partie à ces limitations.

2.7.4 État d'avancement des indicateurs

Le tableau suivant présente l'état d'avancement des 17 orientations proposées dans la Boîte à outils (Sioui, 2014). Le champ « indicateurs » représente le résultat de l'exploration méthodologique obtenu par les présentes recherches. Il existe donc trois catégories de développement des indicateurs:

- Abandonné
- Non-développé
- Statué

Davantage de détails sur la réflexion de chacun d'entre eux sont fournis aux sous-sections suivantes.

Tableau 6. Résumé du développement des indicateurs de durabilité au transport en commun

No	Orientation	Indicateur
1	Potentiel de contact social grâce aux déplacements	Potentiel de rencontre durant les déplacements Variation de l'index d'interaction
2	Déplacements avec peu de nuisances et favorisant l'ambiance de quartier	Indice de marchabilité
3	Part d'activité physique recommandé attribuable aux déplacements	Part du MET quotidien recommandé attribuable aux déplacements
4	Indisponibilité en raison des déplacements	Potentiel de réalisation d'une activité durant le déplacement
5	Richesse et diversité des outils d'information à l'utilisateur	<i>ABANDON</i>
6	Intensité de service, options de transport et équité d'accès	<i>Traité dans le cadre d'un autre projet</i>
7	Quantité de matières désuètes et efficacité de récupération	<i>ABANDON</i>
8	Surface et taux d'utilisation de l'emprise au sol des réseaux de transport	Trace d'occupation de l'espace
9	Quantité et efficacité d'utilisation d'énergie	Quantité d'énergie consommée par les véhicules
10	Quantité, efficacité et équité de distribution des émissions de polluants	Potentiel d'exposition aux polluants pour les utilisateurs Contribution des véhicules aux émissions de polluants
11	Quantité et efficacité des émissions de gaz à effet de serre (GES)	Quantité de GES émis par les véhicules
12	Coûts directs et indirects de déplacement et équité de distribution des coûts	Non-développé
13	Récupération des frais d'utilisation	Non-développé
14	Contribution du transport au PIB	Non-développé
15	Main d'œuvre pour les générateurs d'emplois	Non-développé
16	Accidents et leurs victimes par gravité	Non-développé
17	Niveau de congestion des routes principales	Non-développé

2.7.4.1 *Abandonné*

Tel que mentionné précédemment, l'objectif est d'adapter les indicateurs développés par Sioui (2014) à la réalité du transport collectif; c'est pourquoi deux indicateurs sont abandonnés.

Tout d'abord, l'indicateur 05 - Richesse et diversité des outils d'information aux usagers a été abandonné puisque l'échelle d'implémentation du projet est une société de transport et la disparité des dispositifs de communication au sein de celle-ci est rarement suffisante pour que cet indicateur soit pertinent. Néanmoins, une exploration du niveau de qualité et de l'interactivité des outils d'informations, comprenant une revue de littérature sur le sujet, a été réalisée avant de choisir de l'abandonner.

L'indicateur 07 - *Quantité de matières désuètes et efficacité de récupération* a été abandonné du système final. En effet, bien qu'il s'agisse d'un élément important du développement durable, la disparité des pratiques au sein d'une même société de transport est aussi trop faible pour que cet indicateur contribue à la pertinence de l'évaluation de la durabilité.

2.7.4.2 Non-développé

Les indicateurs ayant ce statut n'ont pas encore été explorés ou sont en cours de développement, sans toutefois être arrivés à l'établissement d'un indicateur final. Ils le seront très prochainement.

2.7.4.3 Statué

Les indicateurs qui ont été statués signifie qu'un cadre méthodologie d'évaluation de l'indicateur a été développé. Pour y arriver, une revue de littérature, une méthodologie et des propositions d'application à diverses échelles sont regroupés au sein d'une « fiche d'évaluation ». Ils sont représentés par l'énoncé de la méthode d'évaluation dans le tableau précédent.

Pour la plupart, une modification de la proposition a été effectuée afin de le spécialiser pour le transport en commun. Toutefois, ils n'ont pas nécessairement été testés. Le but principal du projet est de développer un cadre méthodologique, alors, en raison de contrainte de temps, il ne peut pas être développé davantage pour tous. Toutefois, certains d'entre eux seront élaborés; ils sont présentés aux prochaines sections.

2.7.5 Potentiel de contact social grâce aux déplacements

Le potentiel de contact social a été exploré de façon dynamique. En effet, la façon traditionnelle de mesurer le contact ou l'exclusion se concentre principalement sur le lieu de domicile des individus. Elle comporte une grande limitation dans sa précision, puisque les déplacements entraînent une mixité différente au cours de la journée. De plus récentes études ont tenté d'explorer le lien entre le contact social et la mobilité (Farber, O'Kelly, Miller, & Neutens, 2015; Wong & Shaw, 2011). Ce faisant, une portion de cette étude se penche sur le potentiel de contact avec un groupe social et un niveau de mixité différents de ceux d'un individu.

Pour y arriver, l'Enquête Origine-Destination de Montréal est utilisée. Les secteurs municipaux où se déplace un individu au cours d'une journée sont détaillés heure par heure. Ce faisant, il est possible de connaître sa localisation et, corolairement, les individus présents dans un secteur donné, de façon dynamique. Ainsi la diversité de chaque secteur est calculée à l'aide de l'Index d'interaction (Reardon & Firebaugh, 2002). Quatre caractéristiques sont évaluées : l'âge, le statut, la classe de revenu et l'ethnicité.

Dans la figure suivante, on montre le comportement de la courbe de variation de l'index d'interaction de trois secteurs distincts. Le secteur 101 est au centre-ville, le 304, en banlieue proche et le 681, en milieu rural. On peut donc voir qu'il existe une variation certaine pour certaines caractéristiques, notamment le statut au centre-ville. En effet, puisque durant les heures ouvrables, le centre-ville attire principalement des travailleurs, la mixité de statut diminue considérablement. Un autre élément intéressant soulevé est l'ethnicité du secteur 304. En effet, durant la journée, une proportion importante du groupe le plus représenté quitte le secteur, ce qui fait en sorte que la mixité des personnes restantes augmente.

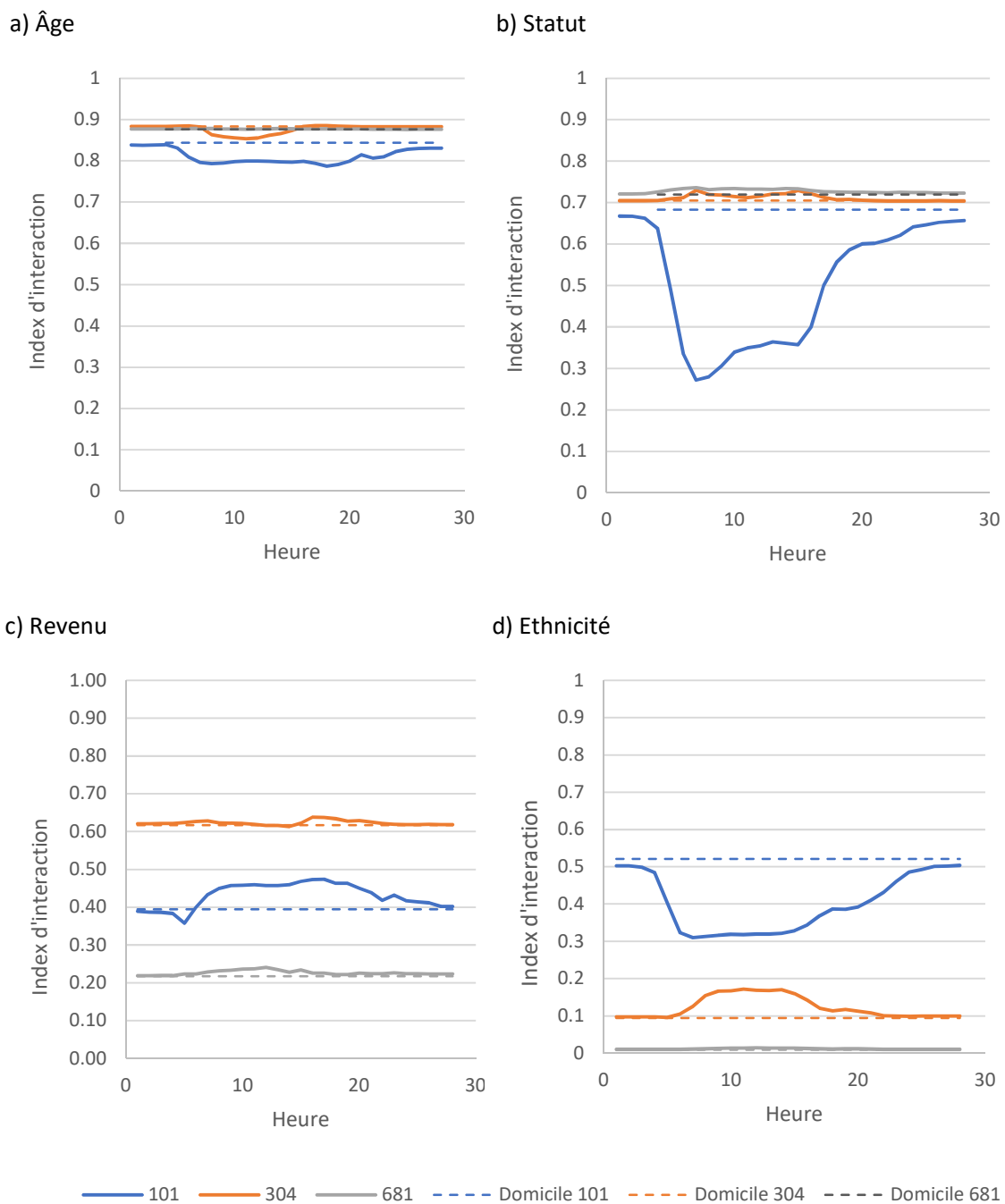
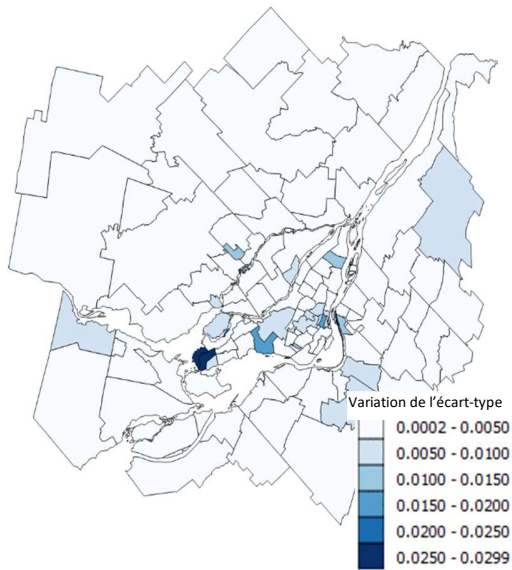


Figure 13 - Variation de l'index d'interaction au sein de secteurs ciblés pour quatre caractéristiques socio-démographiques

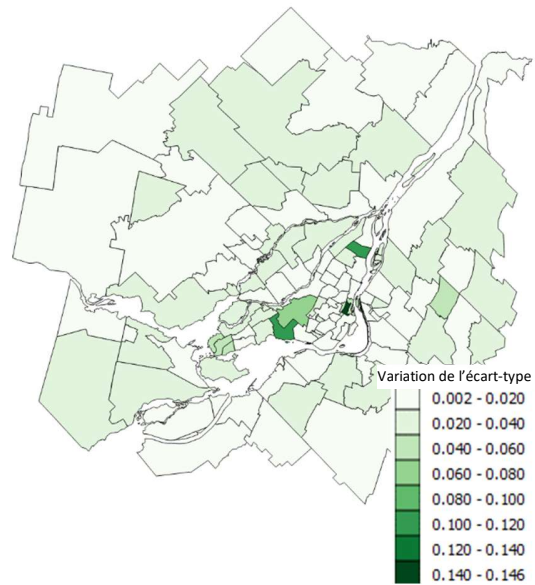
Pour comprendre la variation au sein d'une journée, la variation de l'écart-type est calculée. Cet indicateur permet de mesurer l'amplitude de la variabilité de la mixité d'un secteur. Une faible amplitude signifie que le niveau de mixité d'un secteur ne change peu ou pas, alors qu'une grande amplitude dénote une variabilité considérable dans la composition de la population.

La figure suivante montre les résultats pour l'ensemble du territoire montréalais.

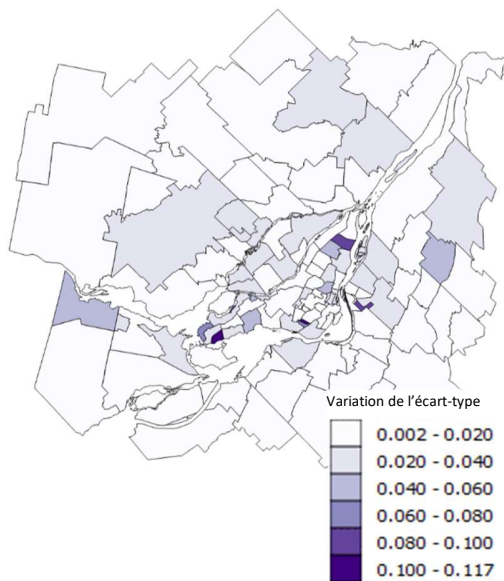
a) Âge



b) Statut



c) Revenu



d) Ethnicité

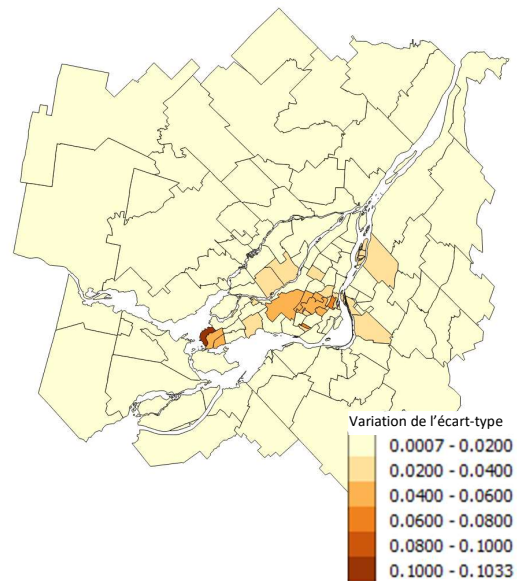


Figure 14 - Visualisation spatiale de la variabilité de l'index d'interaction dans la région montréalaise

On observe plusieurs phénomènes intéressants. Parmi ceux-ci, on peut apercevoir que le centre-ville et les milieux générateurs d'emplois voient une variation plus importante dans leur index d'interaction pour l'ethnicité et le statut principalement.

Ces recherches permettent d'établir la conception d'un indicateur de contact social en utilisant la contribution du transport en commun à la variation de l'index d'interaction. Pour le moment, tous les modes sont considérés, mais l'étude se fera également pour le transport en commun. De plus, il est envisagé de développer un modèle afin de catégoriser les types de secteurs selon leurs caractéristiques et le comportement de l'index d'interaction.

Finalement, dans la même optique que Sioui (2014), le contact social est également travaillé en termes de contact ayant lieu durant les déplacements. Il s'agit d'une méthodologie encore à développer précisément, mais les travaux de Farber, Neutens, Miller, and Li (2013) sont potentiellement intéressants à titre de base pour la formation d'un indicateur. Effectivement, ceux-ci s'intéressent à une modélisation multidimensionnelle de la zone possible de rencontre et du potentiel de contact que peuvent avoir deux individus avec leurs déplacements. Le transport en commun engendrant de nombreux contacts en raison de sa nature même, il est important de considérer cet aspect également.

2.7.6 Part d'activité physique recommandée attribuable aux déplacements

La part d'activité physique est un second indicateur dont la méthodologie sera testée sur le territoire montréalais. Sans actuellement avoir des résultats finaux pour l'ensemble de la région, la méthodologie est ici présentée pour un déplacement théorique.

Dans les travaux de Sioui (2014), l'activité physique est présentée en nombre de pas. Il s'agit également d'une méthodologie utilisée dans diverses autres études en transport (Morency, Trépanier, & Demers, 2011). Néanmoins, afin d'établir un lien plus direct avec l'activité physique, l'indicateur est transformé pour se mesurer en MET (Metabolic Equivalent of Task), une mesure plus courante dans le monde de l'activité physique et de la santé. En effet, elle attribue une valeur à toute activité ou tâche en la comparant à un repos complet (valeur de 1,0). Ce faisant, il est plus facile d'intégrer des variables dans l'effort à produire pour réaliser une tâche.

Dans le cas présent, puisqu'il existe plusieurs facteurs d'influence sur la marche, on étudie l'activité avec gradation de six degrés de précision, présentés au tableau suivant.

Tableau 7. Niveau de précision de l'étude de l'activité physique induite par le transport en commun

Niveau	Temps de marche	Considération de la pente	Considération d'un port de charge	Considération des METs durant le transport en commun
1	Tous	Non	Non	Non
2	Tous	Oui	Non	Non
3	≥10 minutes	Non	Non	Non
4	≥10 minutes	Oui	Non	Non
5	≥10 minutes	Oui	Oui	Non
6	≥10 minutes	Oui	Oui	Oui

Un cas d'application a été formulé sur un déplacement fictif ayant les caractéristiques suivantes. Il s'agit d'un déplacement ayant pour motif « retour au domicile » dont l'origine est un commerce, donc le retour suppose le port d'une charge. Le déplacement dans le véhicule de transport en commun est considéré d'une durée de 10 minutes.

Tableau 8. Caractéristiques de l'exemple de déplacement étudié

	Pour atteindre le transport en commun	Pour atteindre la destination
Pente	3,7%	0,0%
Facteur correctif associé à la pente	1,15	1
Distance de marche	600 m	120 m
Vitesse de marche	5 km/h	5 km/h
Dépense énergétique de marche (MET)	3,25	3,25
Dépense énergétique de marche en portant une charge (MET)	5	5

La dépense énergétique est présentée au tableau suivant. Le niveau d'activité physique recommandé hebdomadairement est 8.125 METs, répartis sur 5 journées (Langlois, Wasfi, Ross, & El-Geneidy, 2016). Quotidiennement, on estime donc une valeur de 1.625 METs.

Tableau 9. Résultats de l'évaluation de la dépense énergétique recommandée dans le cas exemple

Niveau de précision	Dépense énergétique (MET)	Pourcentage recommandé au quotidien
1	0,779	48%
2	0,877	54%
3	0,649	40%
4	0,747	46%
5	0,999	61%
6	1,216	75%

Ainsi, on peut observer que l'ajout de précision dans les caractéristiques du déplacement entraîne une augmentation de la valeur associée à l'activité physique, à l'exception de la considération réduite de temps de marche. En effet, l'OMS (2009) recommande une durée de 10 minutes minimum d'effort pour une tenir compte de l'activité dans le bilan quotidien. Ainsi, les déplacements de marche d'une durée inférieure ne peuvent être tenue en compte à ce niveau de précision, ce qui diminue la portion recommandée qui est accomplie. Néanmoins, il s'agit de résultats très prometteurs, puisque l'OMS souligne une durée minimale de 30 minutes d'activité physique modérée à intense, ce qui concorde relativement bien avec les résultats obtenus.

Pour la suite des travaux, il est évident que la méthode développée sera appliquée à l'ensemble des déplacements réalisés en transport en commun. Dans le système d'indicateur, tous les niveaux de précision seront proposés afin d'appliquer la méthode la plus adéquate pour les données disponibles.

Certains éléments ne sont pas encore considérés dans les calculs. Parmi ceux-ci, le motif de déplacement a été mentionné dans la littérature puisqu'il influence la vitesse de marche. Par

exemple, rendre visite à des proches suppose une activité physique inférieure comparativement à un déplacement vers le travail. Le Compendium of Physical Activity (Ainsworth et al., 2011), guide fournissant les valeurs de METs utilisés, ne fournit pas tous les motifs, mais propose différentes vitesses de marche. Ainsi, des estimations seront nécessaires pour établir la valeur de vitesse associée à un motif ou un facteur correctif, tel qu'utilisé pour la pente.

De plus, la configuration des stations de métro doit être intégrée. Actuellement, les déplacements en métro sont étudiés seulement jusqu'à ou à partir de la porte. Néanmoins, la profondeur des stations, la distance entre les quais pour les transferts, la présence d'infrastructures comme des escaliers roulants ainsi que la taille des quais sont des éléments ayant un impact notable sur l'activité physique lors des déplacements. Il est donc essentiel de les considérer afin de brosser un meilleur portrait.

2.8 Outils d'aide au diagnostic et à la conception de réseaux de transport en commun

- Par: Yann Jeudy, maîtrise
- Supervision: Pre Catherine Morency
- Contexte: Chaire Mobilité

2.8.1 Mise en contexte

Les transports en commun jouent un rôle important dans la dynamique des sociétés d'aujourd'hui. Une bonne mise en œuvre des transports en commun contribue à réduire la congestion routière et les émissions de gaz à effet de serre tout en encourageant l'inclusion sociale. Cependant, les coûts associés à la mise en place des infrastructures de transport public ainsi que ceux liés à leur exploitation peuvent être très élevés. Un réseau optimal devient alors plus difficile à mettre en place. D'une part, le service doit être attractif pour répondre aux besoins des utilisateurs et offrir à tous les segments de la population un bon niveau d'accessibilité. D'autre part, les opérateurs doivent réduire leurs coûts, sachant que les revenus des utilisateurs ne couvrent pas tous les coûts liés à l'exploitation du service.

2.8.2 Revue de littérature

Les recherches sur le problème de conception des routes de transport en commun ont commencé à la fin des années soixante. Holroyd (1967) est l'un des premiers à s'être attaqué théoriquement au problème en essayant de trouver des trajets optimaux ainsi qu'une fréquence de passages optimale. Le problème a été traité de manière analytique avec quelques hypothèses, comme celle d'avoir une grille rectangulaire pour représenter les arrêts de bus. En 1979, Newell aborde le problème relié à l'utilisation d'une telle hypothèse. Depuis, la manière de résoudre ces problèmes a beaucoup évolué.

En 1998, Pattnaik et al. (1998) indiquent que trois caractéristiques doivent être respectées pour qu'un modèle d'optimisation soit utilisable. Le modèle doit:

- Être capable de gérer plusieurs types de problèmes de conception tels que l'attribution de fréquences, l'amélioration d'un réseau existant ou encore la reconception de l'ensemble d'un réseau.
- Effectuer une optimisation dans un temps de calcul raisonnable.
- Être accessible et compréhensible.

Un problème de conception de réseau de transport en commun (TRNDP) peut être séparé en trois grandes parties (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009):

- Quel est l'objectif de la conception ?
- Quels sont les paramètres du problème ?
- Quelle est l'approche d'optimisation à utiliser ?

2.8.2.1 Objectifs de conception

Trois groupes peuvent être affectés par la conception d'un réseau de transport en commun : les utilisateurs, les opérateurs et la communauté ou le voisinage (Van Oudheusden, Ranjithan, & Singh, 1987). Ainsi, certains des objectifs pouvant être formulés pour chaque groupe sont présentés au Tableau 10.

Tableau 10. Objectifs d'optimisation pour différents groupes

Groupe affecté	But
Utilisateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Durée du voyage • Coût du voyage • Paramètres usagers (temps d'attente, nombre de transferts, ...)
Opérateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Coût pour l'opérateur • Revenues • Utilisation de la flotte de bus
Environnement ou communauté	<ul style="list-style-type: none"> • Pollution • Accessibilité

La résolution d'un seul objectif peut être coûteuse pour la santé du réseau de transport en commun. Par exemple, réduire les coûts des utilisateurs uniquement pourrait entraîner des coûts élevés pour les opérateurs et ainsi entraîner la faillite de ceux-ci. Habituellement, la résolution d'un objectif spécifique est effectuée pour simplifier le problème d'optimisation ou pour en étudier un certain aspect (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009).

Il est recommandé de combiner plusieurs objectifs lors de l'optimisation d'un réseau (R Van Nes & Bovy, 2000). Par exemple, une des combinaisons souvent utilisées dans plusieurs articles consiste à minimiser les coûts pour les utilisateurs et à maximiser les revenus des opérateurs (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009; Lee & Vuchic, 2005). Cette dernière combinaison est généralement appelée « Bien-être total ».

2.8.2.2 Paramètres de conception

Afin de concevoir un réseau de transport en commun le plus réaliste possible, il est primordial de prendre en compte les paramètres adéquats en fonction de ce qui est recherché. Dans la littérature, les paramètres à prendre en compte lors de la conception sont divisés plus ou moins en 5 groupes (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009). Le Tableau 11 présente un résumé des paramètres le plus retrouvés dans la littérature.

Tableau 11. Paramètres à considérer pour l'optimisation du service

Groupe	Paramètres
Variable de décisions	Tracé des routes Fréquences Tarif Localisation des arrêts
Modèle de demande	Plusieurs à un Plusieurs à plusieurs
Caractéristiques de la demande	Fixe Variable (selon heure, période, ...)
Stratégies d'opération	Type de service (Express, régulier, ...)
Contraintes	Fréquence réaliste Taille des bus Grosseur de la flotte de bus Durée maximale et minimale des trajets de bus Nombre de lignes Budget

2.8.2.3 Méthode d'optimisation

Étant donné que la fonction à optimiser pour améliorer un réseau de transport en commun (fonction d'objectif de conception) est une fonction non convexe (Newell, 1979), la résolution d'un tel problème devient très compliquée. La non-convexité de cette fonction rend pratiquement impossible la recherche du maximum global (ou d'en être certain). De plus, l'optimisation d'un tel système est d'autant plus complexe puisqu'il est difficile de représenter mathématiquement certaines caractéristiques (Chakroborty & Engineering, 2003). Par conséquent, la conception d'un réseau de transport en commun est un problème combinatoire classé dans la catégorie NP-difficile (Barra, Carvalho, Teypez, Cung, & Balassiano, 2007). Dans la littérature, il existe principalement deux approches de résolution (Kepaptsoglou & Karlaftis, 2009) :

- Approche conventionnelle
- Approche heuristique

2.8.2.4 Synthèse

En effectuant cette revue de littérature, il a été possible de créer un schéma résumant les différentes étapes avant l'application d'une méthode d'optimisation. Ce dernier est présenté à la Figure 15.

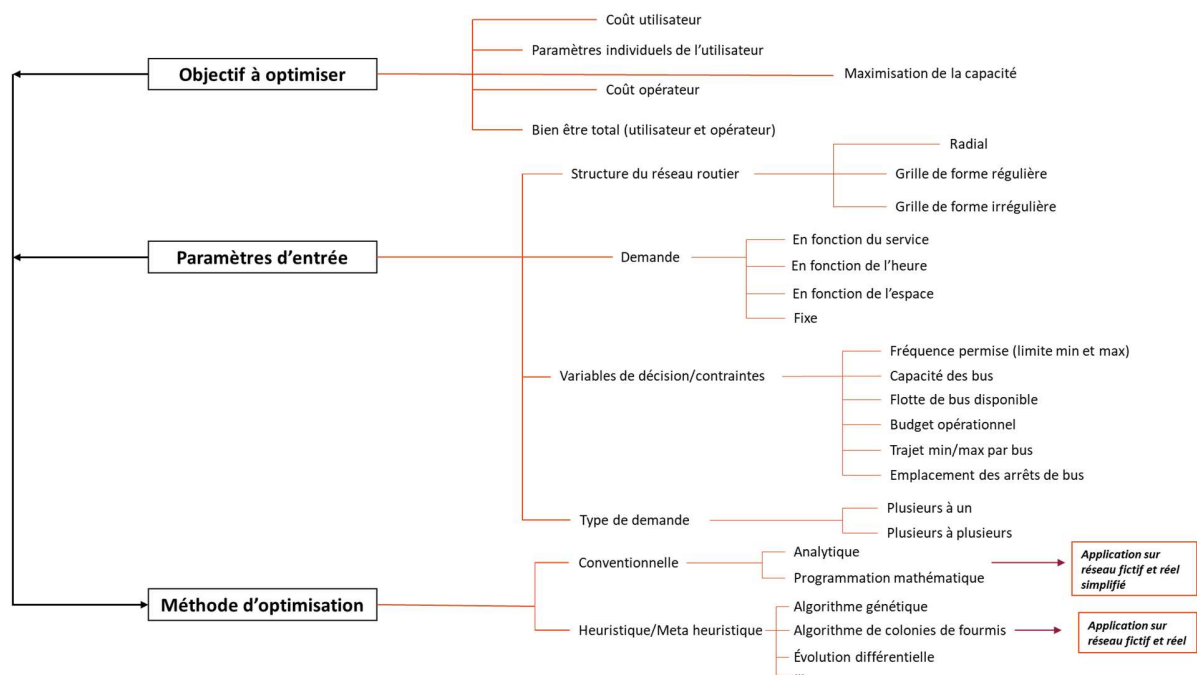


Figure 15. Schéma récapitulatif

Bien que certains paramètres d'entrée dans une méthode d'optimisation soient faciles à déterminer (Ex. : structure du réseau routier), d'autres demandent un peu plus d'analyse (Ex. : le type de demande à utiliser).

Ce projet de recherche se concentre tout d'abord sur la recherche d'outils et d'indicateurs permettant de faire un diagnostic de la situation actuelle d'un réseau de transport en commun à l'étude et ainsi déterminer les paramètres d'entrée à prioriser (variable de décision, type de demande...).

2.8.3 Méthodologie

Pour mieux comprendre ce qui est fait durant ce projet, une brève méthodologie des différents sujets couverts est présentée.

Les deux principales bases de données utilisées sont :

- L'enquête Origine-Destination de 2013
- Le « General Transit Feed Specification » (GTFS) couvrant la période d'automne 2013

2.8.3.1 Caractéristiques sociodémographiques

Le premier grand sujet abordé est l'étude des caractéristiques sociodémographiques de la zone à l'étude. Ceci permet de qualifier la population y vivant et de mieux comprendre le service qu'il devrait recevoir en matière de transport en commun. De simples indicateurs par exemple la répartition de la population par tranches d'âge ou par leur occupation principale sont utilisés entre autres.

2.8.3.2 Comportement face aux déplacements

Le deuxième point abordé correspond à l'analyse du comportement des citoyens face à leur déplacement. Une telle analyse permet de voir les habitudes quotidiennes. Pour atteindre cet

objectif, de multiples indicateurs sont calculés et présentés sous forme de tableaux, de graphiques ou de cartes.

Encore une fois de simples indicateurs tels que le taux de mobilité, le taux de possession de permis de conduire ou encore le mode de déplacement utilisé permet de noter certains faits saillants.

De plus, des indicateurs un peu plus complexes sont aussi utilisés pour avoir une compréhension plus en détail. Un des outils permettant de faire ce type de diagnostic est l'utilisation de Traclus-DL, programme mis sur pied par Kinan Bahbouh. Celui-ci permet de créer des lignes de désirs. Ce dernier est défini comme un regroupement de déplacements similaires selon certains paramètres pour identifier les flux dominants de trajectoires encore appelés corridors de demande (Bahbouh, 2017). Pour permettre une utilisation optimale de celui-ci, de multiples simulations sont effectuées pour trouver les meilleurs paramètres à utiliser. Par la suite, les corridors de demandes créés sont dissous sur une grille d'abeille où les cellules hexagonales prennent un poids en fonction du nombre de segments de corridors s'y trouvant et du facteur de pondération du déplacement associé. La Figure 16 présente un exemple des différentes étapes.

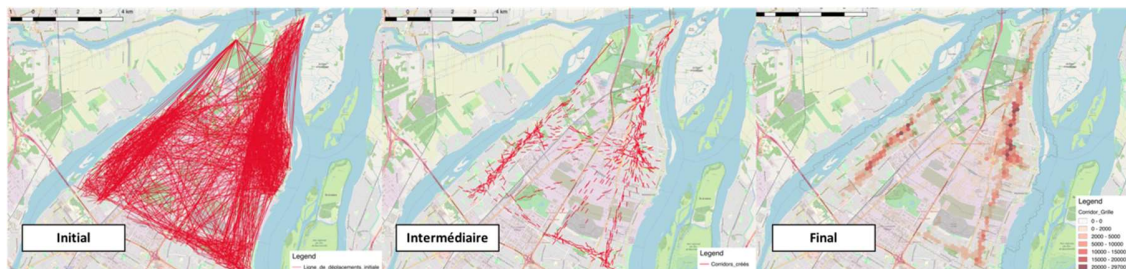


Figure 16. Processus de création de lignes de désirs

De multiples cartes de ce genre seront produites pour différentes strates (personnes âgées, déplacement en automobile, déplacement TC...) et par la suite analysées.

Les lignes de désirs sont un parmi d'autres indicateurs (distribution temporelle, carte de densité de destination...) qui sont utilisés dans ce projet pour mieux comprendre le comportement des usagers.

2.8.3.3 Profil de l'offre

En parallèle à l'analyse de la demande, l'offre de service est aussi étudiée. La première étape est de spatialiser le réseau et ainsi permet d'avoir une première visualisation de l'ampleur du service disponible.

Par la suite, des indicateurs similaires à ceux utilisés lors de l'analyse du comportement des usagers face aux déplacements sont calculés ou cartographiés pour permettre une comparaison entre les deux (lignes de désirs Vs ligne de service, distribution temporelle de la demande Vs distribution temporelle de l'offre...).

D'autres indicateurs propres au profil de l'offre sont étudiés. Par exemple, un indicateur de disponibilité est évalué. La disponibilité de service revient à calculer le nombre d'heures de service qu'un ménage a droit pendant une journée sur un certain rayon. Ce dernier est déterminé à l'aide de la tortuosité de la zone d'étude et la distance déclarée par les utilisateurs pour atteindre l'arrêt de bus utilisé.

Pour mieux comprendre comment la disponibilité est calculée, un exemple est présenté à la Figure 17.

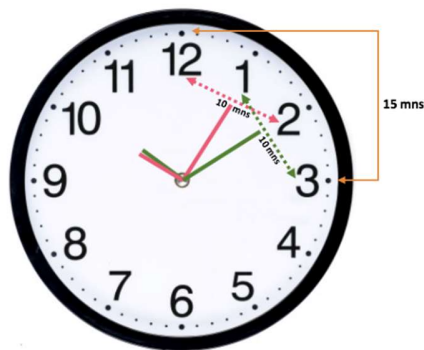


Figure 17. Exemple de calcul de disponibilité

Supposez que dans le rayon de X mètres prédéterminé d'un ménage, deux bus passent, un à 10H05 et l'autre à 10H10, et qu'un intervalle de disponibilité de 10 minutes (5 minutes avant le passage et 5 minutes après le passage) est voulu. Alors, il y a une disponibilité de 15 minutes qui va de 10H00 à 10H15 pour cette résidence. Un calcul similaire est fait pour l'ensemble des ménages en prenant en compte l'ensemble des passages de bus sur 24 heures. Les résultats sont cartographiés.

Il faut aussi noter qu'une étude de la configuration du réseau sera faite à l'aide d'indicateur provenant de ce qu'on appelle le « spatial network ».

2.8.4 Aide à la conception- Demande latente

Lors de la conception ou l'amélioration des réseaux de transport en commun, la demande latente doit avoir une grande place dans le processus.

Dans la littérature, la demande latente peut-être définie de multiple manière :

- Un désir pour un service qu'un utilisateur ne peut pas satisfaire parce qu'il n'a pas les moyens, parce que le service n'est pas disponible ou encore il ne sait pas que ce service est disponible. (Cambridge-Dictionary, 2016)
- Un flux de déplacement additionnel qui souhaite utiliser un certain type de service, mais qui est découragé à le faire par le fonctionnement insatisfaisant de celui-ci (Henk, 1989).

Une telle demande est assez difficile de discerner. La demande latente peut être catégorisée sous 4 grandes sphères (Clifton & Moura, 2017) :

Type 1 : Souhaite effectuer des activités, mais le système de transport en place ne le permet pas.

Le titre de ce type de demande latente l'explique de manière concrète. Le système de transport en place ne répond pas à la demande.

Type 2 : Souhaite effectuer des activités, le système de transport en place le permet, mais il y a la présence d'autres barrières.

Dans ce type de demande latente, la population a accès à un système de transport répondant à leur « voulu », mais il y a en place des barrières par exemple :

- La pauvreté (ne possède pas les moyens pour effectuer les activités voulues ou prendre le transport en commun),
- Un horaire trop chargé (pas de temps pour faire les activités souhaitées)
- L'exclusion sociale.

Type 3 : Ne souhaite pas effectuer d'activités, mais il y a un système de transport en place adéquat et pouvant répondre à des demandes supplémentaires.

Dans ce type de demande latente, la population a encore accès à un système de transport pouvant répondre à une demande supplémentaire. Cependant dans ce type de demande latente, il se peut que :

- Les usagers ne sont pas motivés à produire des déplacements supplémentaires.
- Ils ignorent l'existence d'activités qui pourraient les intéresser.
- Ils ne connaissent pas le fonctionnement des systèmes en place (comment les utiliser ou encore les destinations que ces services desservent).

Type 4 : Ne souhaite pas effectuer d'activités et le système de transport en place n'est pas adéquat pour répondre à toutes demandes. Dans ce type de demande latente, il y a aussi possiblement un système qui est mis en place qui permet de ne pas avoir à se déplacer. Différents exemples peuvent être utilisés pour mieux comprendre :

- Livraison par drone.
- Véhicule autonome.
- Magasinage en ligne.
- ...

Dans ce projet, il y a un intérêt qui est porté principalement au type 1 et au type 4. De multiples méthodes sont analysées pour tenter d'évaluer ces deux types de demandes latentes.

2.8.5 Présentation de la zone étudiée

Pour mieux visualiser et comprendre les différents concepts utilisés, une étude de cas est employée.

La zone utilisée se situe à l'extrême Est de l'île de Montréal. Elle comprend les arrondissements suivants : Montréal-Est, Rivières des prairies, la partie Est d'Anjou et une petite partie de Mercier-Hochelaga Maisonneuve. Ces deux derniers ont été insérés dans l'étude pour garder une partie importante du réseau routier connectant Montréal-Est et Rivière des prairies. La superficie totale de la zone étudiée est de 65 km² avec une population d'environ 155 000 habitants (Statistique Canada, 2016) soit 10 % de la population montréalaise.

La Figure 18 présente sur une carte l'emplacement et la surface d'emprise de cette zone.

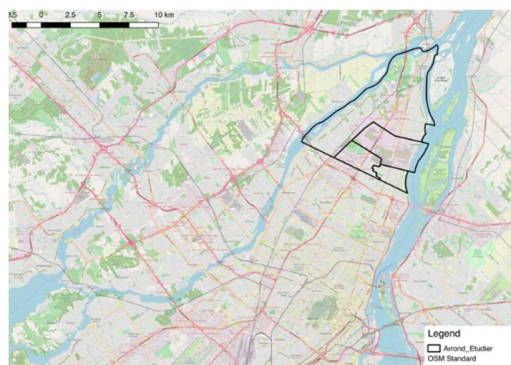


Figure 18. Zone à l'étude

Dans l'enquête Origine-Destination, 6371 résidents ont été interrogés. En appliquant les facteurs de pondération associés à chacun d'entre eux, l'ensemble de la population résidente est représenté (150 575 personnes).

Par la suite, la zone étudiée possède un total de 842 arrêts d'autobus et 67 lignes de bus qui la traversent en parcourant en moyenne 7,6 kilomètres. Il est important de spécifier que les trajets ayant des directions opposées sont considérés comme des lignes de bus distincts (ex : 22-E et 22-O représentent au total 2 lignes de bus). La Figure 19 montre la disposition géographique des différents arrêts et lignes de bus. Il y a une bonne répartition géographique des arrêts et des lignes de bus. Les zones 1 et 2 qui sont notées sur cette figure représentent des zones industrielles (1) et des zones vertes (2) ce qui explique l'absence de services à ces lieux.

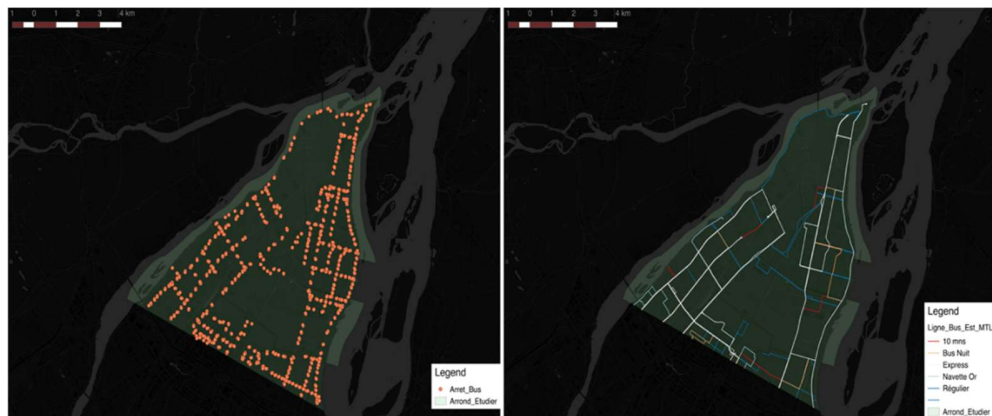


Figure 19. Arrêts et lignes de bus dans la zone à l'étude

2.9 Arbres de choix modal utilisant les ratios de compétitivité

- Par : Jean-Simon Bourdeau, associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité – inspiré des travaux de Pelletier-Grenier, P. (2018). Modélisation de l'impact de la performance des modes actifs et collectifs sur le choix modal. (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal) - <https://publications.polymtl.ca/3047/>

2.9.1 Problématique

La modélisation du choix modal est utilisée afin d'expliquer et prédire le mode de transport qu'une personne choisira afin de faire un déplacement. Cette problématique est étudiée depuis longtemps par les chercheurs et les praticiens. Un grand nombre de facteurs pouvant avoir une influence sur le choix modal sont énumérés dans la littérature; Martel-Poliquin (2012) en a d'ailleurs fait une synthèse dans le cadre de recherches réalisées au sein de la Chaire Mobilité. L'objectif de la présente analyse est d'évaluer quelle est la capacité des temps de déplacement d'expliquer les modes empruntés. Pour ce faire, des ratios de compétitivité (basés sur les temps de déplacement des différents modes) seront calculés et seront utilisés afin de produire des arbres de choix modal.

2.9.2 Contexte

L'arbre de décision est un modèle de classification dont la popularité est grandement due à sa simplicité. L'objectif est de produire des groupes d'individus les plus homogènes possibles du point de vue de la variable à prédire (Rakotomalala, 2005).

La méthode CART, proposé par Breiman, Friedman, Ohlsen et Stone (1984), permet de construire un arbre de décision par division binaire à chaque noeud. Appropriée pour l'analyse de variables catégorielles, cette méthode n'impose pas de règle d'arrêt et fournit l'arbre le plus complet possible, tendant vers des feuilles pures.

L'arbre de décision est composé de branches et de feuilles. À partir du sommet, les branches mènent aux feuilles, qui sont le niveau terminal de chacune des branches. Le niveau de pureté d'une feuille représente la mixité du choix modal issu des déplacements classifiés dans cette branche. Une feuille où 100% des déplacements auraient été faits par le même mode serait une feuille pure. Chaque nouvelle branche tend à augmenter la pureté des feuilles.

Cette méthode comporte plusieurs avantages mais aussi des limitations majeures. Il peut aisément être représenté graphiquement, ce qui aide à sa compréhension et il peut être utilisé comme un puissant outil de communication. C'est une méthode flexible qui accepte une mixité de variables; l'arbre peut classer un mélange de variables nominales et continues. C'est également un algorithme très robuste vis-à-vis des valeurs extrêmes. Toutefois, l'aspect séquentiel est sa majeure limitation. Bien que rapide, le modèle d'investigue qu'un nombre restreint de possibilités à chaque étape, sans remise en cause des choix précédents (Decaestecker et Saerens, 2017).

2.9.3 Méthodologie

2.9.3.1 Calcul des ratios de compétitivité

La première étape de la démarche consiste à calculer des ratios de compétitivité. Pour ce faire, les temps de déplacement sont simulés pour les modes de déplacement suivants : l'automobile, la marche, le vélo et le transport en commun. Ces temps sont calculés pour tous les déplacements valides des enquêtes Origine-Destination (OD) de 2008 et 2013. Les temps sont calculés avec les outils suivants :

- Temps auto : calculés avec des simulations de temps de parcours à l'équilibre dans le logiciel EMME;

- Temps de marche : calculés avec OSRM², avec une vitesse supposée constante de 5 km/h;
- Temps à vélo : calculés avec OSRM, avec une vitesse de déplacement qui prend en considération les pentes;
- Temps en transport en commun : calculés avec l'application libre d'accès trRouting, développée par la Chaire Mobilité (<https://github.com/kaligrafy/trRouting>). Cette application utilise l'algorithme CSA (Connection Scan Algorithm) pour les calculs d'itinéraires en transport collectif ; cette application prend en compte les horaires planifiés des différents services à l'aide des fichiers GTFS importés.

Une fois les temps de déplacements calculés, les ratios de compétitivité peuvent être établis. Dans un premier temps, le temps de déplacement de référence est établi comme étant le temps en automobile. Ainsi, trois ratios sont calculés :

- Le ratio tc (r_{tc}) : temps en transport en commun / temps en automobile;
- Le ratio marche (r_{marche}) : temps à pied / temps en automobile;
- Le ratio vélo ($r_{vélo}$) : temps en vélo / temps en automobile.

Il est évident que ces ratios ne seront pas en mesure de segmenter les déplacements faits en automobile conducteur et passager, leurs temps de déplacement étant similaires. Il faudra recourir à d'autres variables pour séparer ces deux modes.

2.9.3.2 Production des arbres de classification

Les arbres de classification sont produits à l'aide de la bibliothèque « rpart » du logiciel R. Dans un premier temps, pour tous les ensembles de données, 80 % des observations sont sélectionnées afin de construire l'arbre. Il s'agit du jeu de données d'entraînement. Ensuite, le choix modal est prédit pour le reste des déplacements, c'est-à-dire 20 % des observations qui ne font pas partie du jeu de données d'entraînement. Il s'agit du jeu de données de validation. Ce jeu de données est utilisé pour produire une matrice de confusion et pour calculer le pourcentage d'erreur, c'est-à-dire le pourcentage des observations pour lesquelles le mode prédit n'est pas le mode observé. Les modes ont préalablement été agrégées en six catégories : auto conducteur (auto_c), auto-passager (auto_p), autre, marche, transport en commun (tc), et vélo.

Deux arbres sont prédits à chaque fois. Un premier arbre est calculé avec les ratios de compétitivité et la distance réseau du déplacement. Un deuxième arbre est calculé avec les variables du premier arbre, auquel s'ajoute des variables sur la personne qui a effectué le déplacement : son âge, son genre et la possession ou non d'un permis de conduire.

2.9.4 Résultats

La section qui suit présente les résultats pour les déplacements des enquêtes OD de 2008 et de 2013, pour trois ensembles de données :

- Tous les déplacements;
- Tous les déplacements motif travail;
- Tous les déplacements motif étude.

Pour chaque ensemble de données, un arbre de classification est présenté, avec les branches permettant de déterminer le mode plausible. Ensuite, une matrice de confusion est présentée,

² <http://project-osrm.org/>

avec le pourcentage d'erreur, qui correspond au pourcentage de déplacements pour lesquels le mode prédit est différent du mode déclaré.

Les feuilles dans l'arbre de classification sont lues comme ceci :

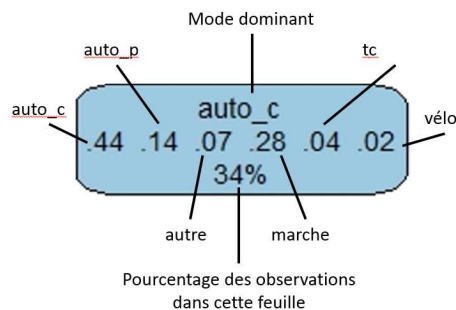


Figure 20. Description des informations contenues dans les feuilles des arbres de classification

2.9.4.1 Tous les déplacements – ratios et distances seulement

Résultats pour 2008

La Figure 21 montre que l'arbre est seulement capable de prédire trois modes de déplacement soit marche, auto conducteur et transport en commun. Le premier critère de séparation est une distance de 1513 mètres en deçà de laquelle, 30% des déplacements sont faits à pied. Pour les déplacements plus longs que cette distance seuil, c'est le ratio entre le temps en transport en commun et le temps en automobile qui sépare les feuilles. Un ratio de 2.4 fait une première séparation puis c'est un nouveau seuil de distance, de 17 km, qui permet de séparer en deux feuilles, l'une, comptant pour 10% des observations, étant dominée (part modale de 36% pour le TC) par le transport en commun (lorsque la distance est inférieure à 17 km).

Le Tableau 12 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est de 45,0 %. Ceci veut tout de même dire que seulement avec la longueur du déplacement et les ratios de temps de déplacement, on prédit 55% du choix modal (24 heures).

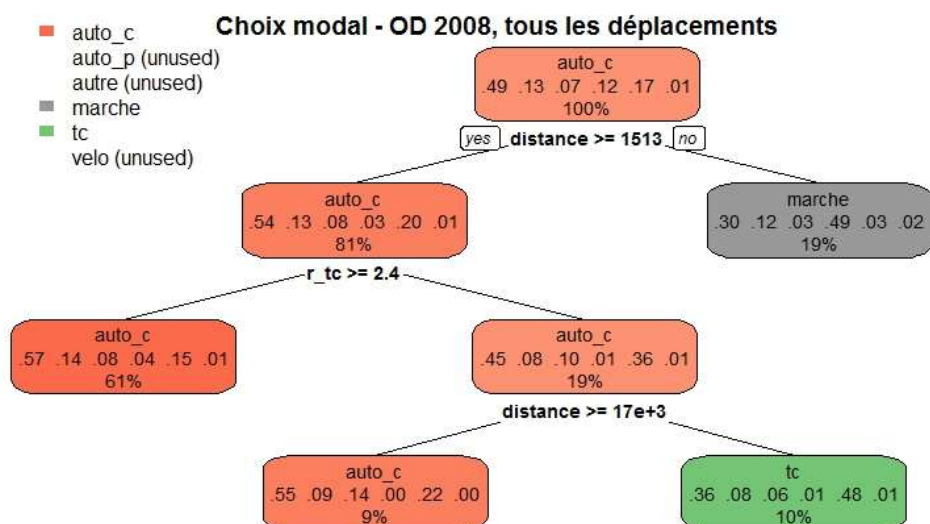


Figure 21. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2008

Tableau 12. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	40,5%	0	0	5,6%	3,7%	0
	auto_p	9,3%	0	0	2,4%	0,8%	0
	autre	6,1%	0	0	0,7%	0,6%	0
	marche	2,5%	0	0	9,5%	0,1%	0
	tc	11,1%	0	0	0,6%	5,0%	0
	velo	0,9%	0	0	0,4%	0,1%	0

Résultats pour 2013

Le constat est assez similaire avec les données de 2013 mais dans ce cas, seuls deux modes sont prédits par l'arbre à savoir l'auto conducteur et la marche (voir Figure 21). Le premier critère de séparation est une distance de 1504 mètres, ce qui s'approche de la distance identifiée par l'arbre avec les données de 2008. Le second critère de séparation est le ratio de déplacement entre la marche et l'automobile ; lorsque celui-ci est inférieur à 1.1 (pour des déplacements de moins de 1.5 km), la marche domine. Cette branche ne correspond toutefois qu'à 5% des observations.

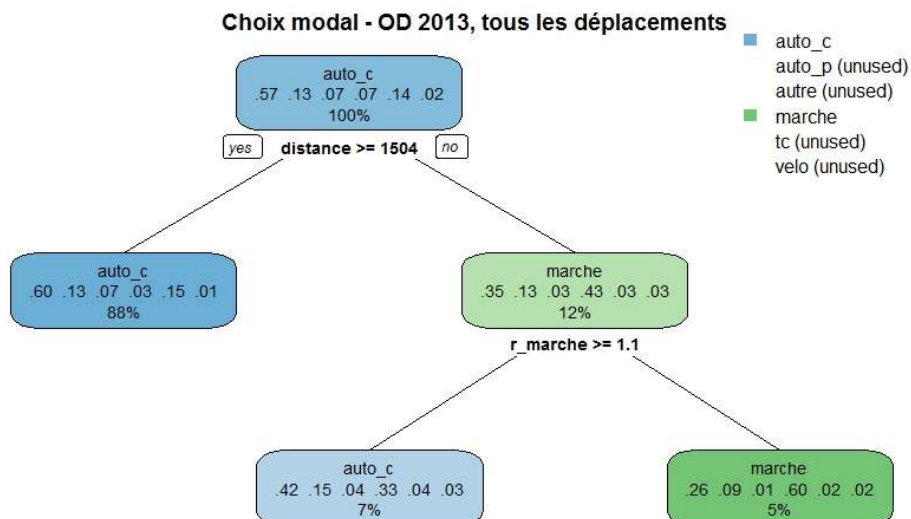


Figure 22. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2013

Le Tableau 13 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 42,4 %.

Tableau 13. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios et distances seulement, 2013

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	54,8%	0	0	1,3%	0	0
	auto_p	12,6%	0	0	0,4%	0	0
	autre	6,5%	0	0	0,1%	0	0
	marche	6,2%	0	0	2,8%	0	0
	tc	13,7%	0	0	0,1%	0	0
	velo	1,5%	0	0	0,1%	0	0

2.9.4.2 Tous les déplacements – ratios, distances et attributs de la personne

Résultats pour 2008

L'ajout de propriétés de la personne permet d'améliorer les performances de l'arbre de décision. La Figure 23 montre que l'arbre est capable de prédire tous les modes sauf l'auto passager et le vélo. Le premier critère de séparation est la possession d'un permis de conduire. Tous les déplacements faits par une personne possédant un permis de conduire sont mis dans la feuille de gauche dans laquelle la part modale de l'auto conducteur est de 68% - c'est donc un critère très discriminant. Pour le sous-arbre de droite, les critères de segmentation en feuilles sont la distance (encore 1.5 km) et l'âge.

Le Tableau 14 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est de 35,5 %.

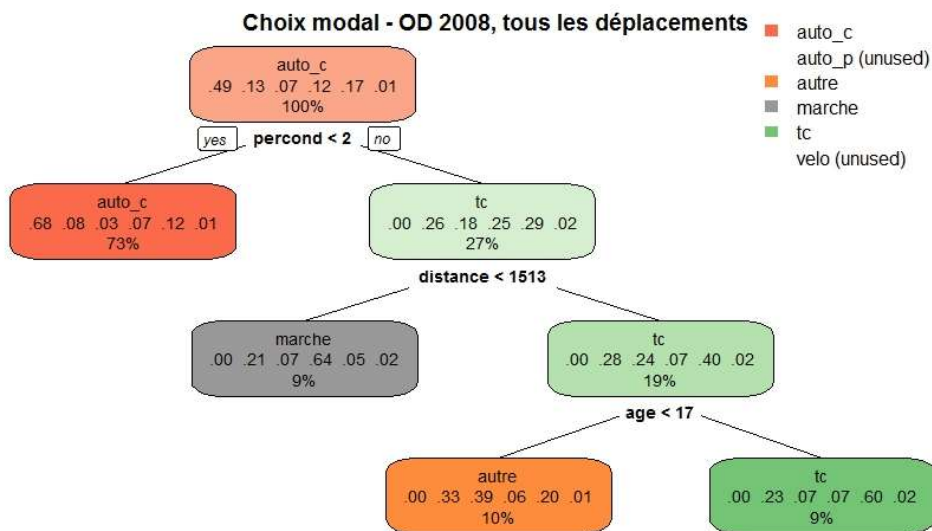


Figure 23. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

Tableau 14. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	49,8%	0	0,0%	0,0%	0,0%	0
	auto_p	5,6%	0	3,1%	1,8%	2,0%	0
	autre	2,4%	0	3,7%	0,6%	0,7%	0
	marche	5,5%	0	0,6%	5,4%	0,6%	0
	tc	8,9%	0	1,9%	0,4%	5,6%	0
	velo	0,9%	0	0,1%	0,2%	0,2%	0

Résultats pour 2013

Les résultats obtenus avec les données de 2013 sont très similaires : la possession d'un permis de conduire est aussi la première variable choisie par l'arbre pour segmenter les déplacements selon le mode dominant. Ainsi, pour 2013, 79% des déplacements faits par des personnes possédant un permis de conduire le sont en auto conducteur. Dans ce cas, la distance est aussi le second critère mais à une valeur un peu plus élevée soit 1.8 km. Ainsi, 55% déplacements de moins de 1.8 km faits par des personnes ne possédant pas de permis de conduire sont faits à pied. Les deux critères d'âge qui suivent permettent d'observer la part importante de déplacements faits en auto passager pour les jeunes.

La Figure 24 montre que l'arbre est capable de prédire tous les modes sauf le vélo. Le premier critère de séparation est la possession d'un permis de conduire.

Le Tableau 15 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 31,6 %.

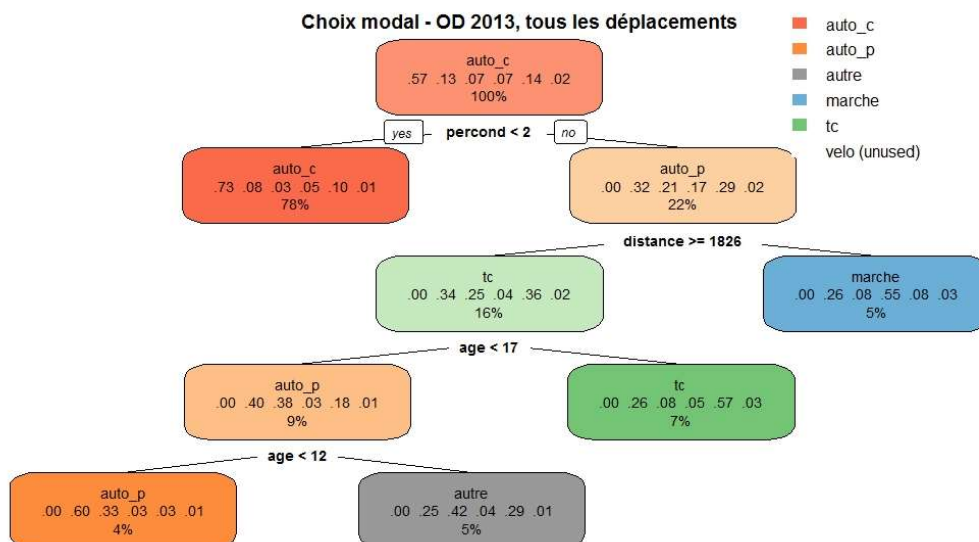


Figure 24. Arbre de classification, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

Tableau 15. Matrice de confusion, tous les déplacements, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	56,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0
	auto_p	6,3%	2,1%	1,2%	1,4%	1,9%	0
	autre	2,4%	1,2%	2,0%	0,4%	0,5%	0
	marche	3,7%	0,1%	0,2%	2,7%	0,4%	0
	tc	7,7%	0,1%	1,5%	0,4%	4,2%	0
	velo	1,2%	0,0%	0,1%	0,1%	0,2%	0

2.9.4.3 Déplacements motif travail – ratios et distances seulement

Résultats pour 2008

La création d'arbre pour certains types de motif permet de tenir compte des différences de valeur du temps et de contexte pour les différents types de déplacement. La Figure 25 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, en auto conducteur, ou en transport en commun. Le premier critère de séparation est une distance de 1911 mètres, ceux étant inférieurs à cette distance étant majoritairement réalisés à pied (à 43%). Pour la branche de droite, un second critère de distance permet de faire ressortir que les déplacements de moins d'un kilomètre (982 m) sont à 59% faits à pied. Pour la branche de gauche, celle-ci se segmente à plusieurs reprises selon des critères de seuils de compétitivité puis à nouveau de distance. Ainsi, pour des ratios de temps TC supérieurs à 2.5, c'est le mode auto conducteur qui domine avec une part modale de 72%. Lorsque ce ratio est inférieur à 2.5, l'auto conducteur domine encore mais avec seulement 52% de part modale et le critère de distance revient segmenter la branche en sous-branches au seuil de 16 km. Sous cette distance, le transport en commun domine avec 50% de part modale. Lorsque le ratio de temps TC est sous 2.1, la part du transport en commun est augmentée à 60%. On voit ici l'impact de la compétitivité du TC pour les déplacements de moins de 16 km. Bien que le vélo ne soit jamais le mode dominant, il est tout de même automatiquement identifié dans l'arbre comme variable de segmentation en fin de branche. Il doit dans ce cas agir comme proxy témoignant de la moindre performance du TC.

Le Tableau 16 montre que la majorité des déplacements sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 34,8 %.

Choix modal - OD 2008, déplacements motif travail

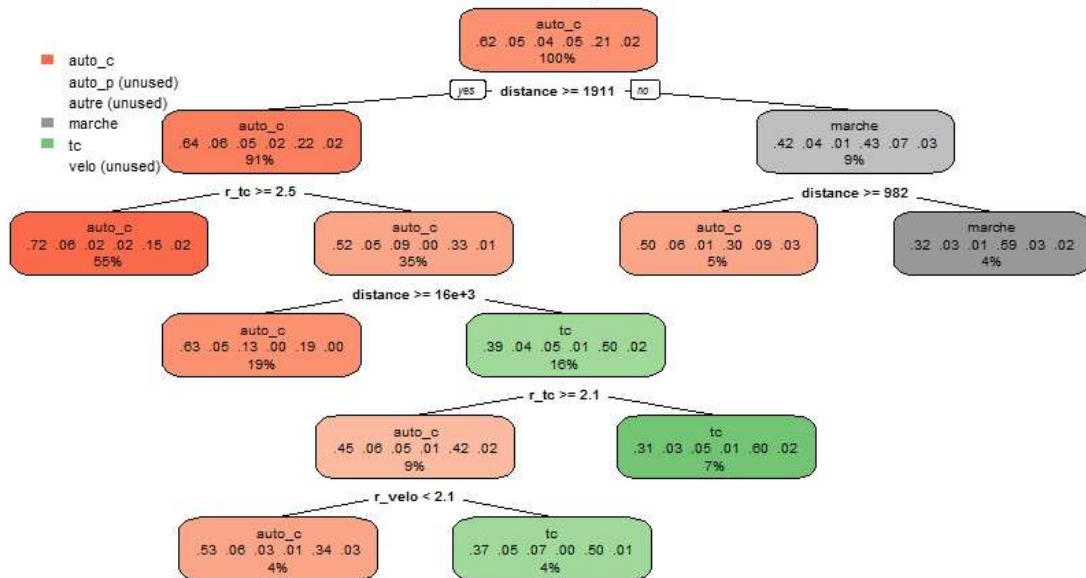


Figure 25. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008

Tableau 16. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	86,6%	0	0	2,0%	6,4%	0
	auto_p	7,5%	0	0	0,2%	0,7%	0
	autre	5,6%	0	0	0,0%	1,1%	0
	marche	4,7%	0	0	3,5%	0,0%	0
	tc	22,6%	0	0	0,2%	9,8%	0
	velo	2,1%	0	0	0,0%	0,3%	0

Résultats pour 2013

La même démarche est entreprise avec les données de 2013. La Figure 21 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied ou en transport en commun. Dans ce cas, le premier critère de segmentation est le ratio de compétitivité de la marche à une valeur de 4.2. Lorsque le ratio est supérieur à cette valeur (grosso modo 4.1 fois plus long marcher que se déplacer en auto conducteur), c'est 81% des déplacements qui sont faits en auto conducteur. Lorsque le ratio est inférieur, l'arbre se décompose à plusieurs niveaux. D'abord, un critère de distance (3242 mètres) segmente les déplacements en deux grandes branches qui mèneront vers des sous-branches à dominance TC et marche. Ainsi, les déplacements pour lesquels le transport en commun est dominant sont ceux dont la distance est supérieure à 3.2 km et dont le ratio de compétitivité de la marche est inférieur à 2.8.

Le Tableau 17 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 30.5 %.

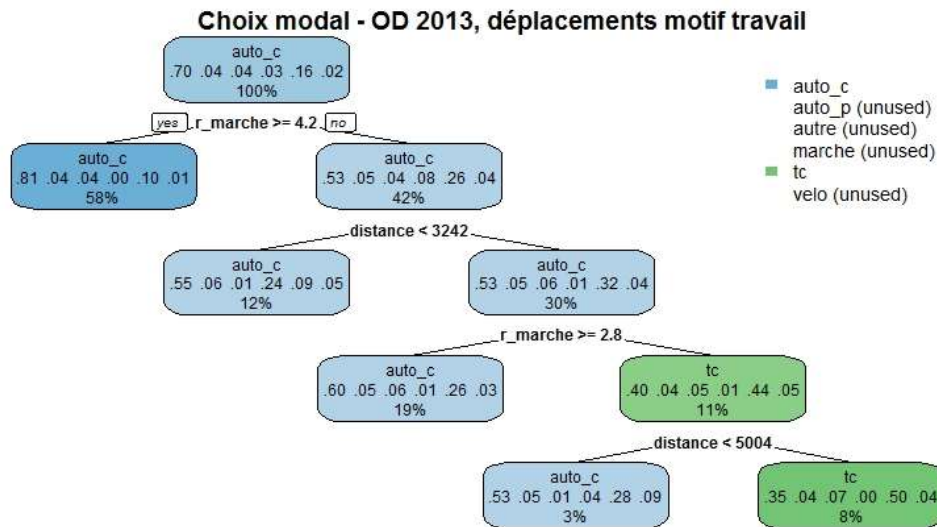


Figure 26. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2013

Tableau 17. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios et distances seulement, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	65,6%	0	0	0	3,4%	0
	auto_p	4,0%	0	0	0	0,3%	0
	autre	4,2%	0	0	0	0,6%	0
	marche	3,4%	0	0	0	0,0%	0
	tc	12,7%	0	0	0	4,0%	0
	velo	1,6%	0	0	0	0,2%	0

2.9.4.4 Déplacements motif travail – ratios, distances et attributs de la personne

Résultats pour 2008

Lorsqu'on inclut des variables décrivant les voyageurs, on observe que celles-ci s'avèrent importantes dans le choix du mode de transport. Dans ce cas-ci, la possession du permis de conduire est la première variable identifiée par l'arbre pour segmenter le principal mode de transport. Pour les déplacements travail, le fait de ne pas posséder de permis de conduire classe les déplacements dans les modes transport en commun et marche (modes dominants). C'est la distance qui est déterminante entre ces deux principaux modes. Ainsi, pour les déplacements de moins de 2.3 km, c'est la marche qui est dominante avec une part modale de 62% alors que pour les déplacements plus longs, c'est le transport en commun qui est dominant avec une part de 73%. Cette branche (des déplacements travail faits par des personnes ne possédant pas de permis de conduire) ne compte toutefois que 10% des déplacements. Pour la branche des déplacements faits par des personnes possédant un permis de conduire, on retrouve le transport en commun comme mode dominant (avec une part modale de 50%) pour les déplacements ayant un ratio de temps TC inférieur à 2.2 et une distance de moins de 16 km – ceux-ci ne comptant que pour 9% des déplacements motifs travail.

La Figure 27 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, en auto conducteur ou en transport en commun. Le premier critère de séparation est la possession d'un permis de conduire.

Le Tableau 18 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 29,9 %.

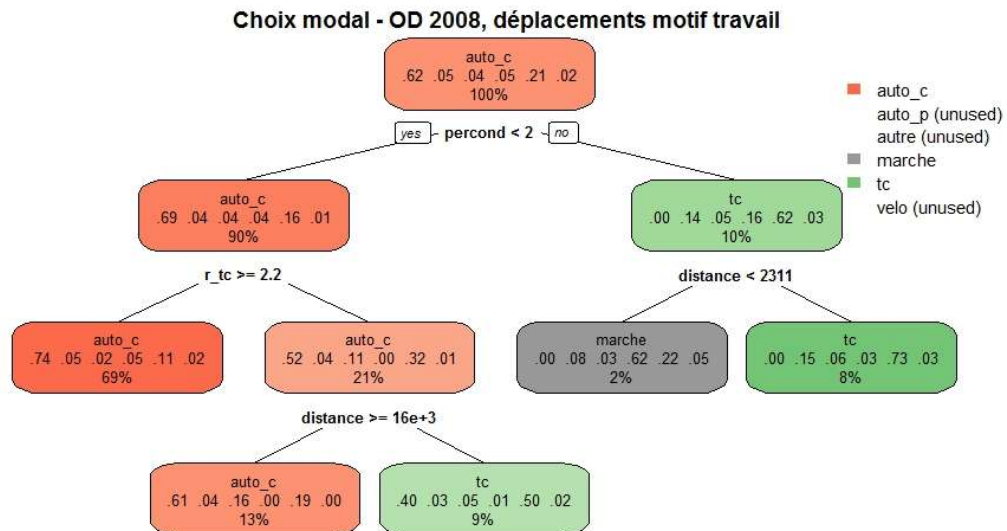


Figure 27. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

Tableau 18. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	89,6%	0	0	0,0%	5,5%	0
	auto_p	5,8%	0	0	0,3%	2,3%	0
	autre	5,1%	0	0	0,1%	1,5%	0
	marche	5,9%	0	0	2,1%	0,3%	0
	tc	16,0%	0	0	0,8%	15,9%	0
	velo	1,7%	0	0	0,1%	0,6%	0

Résultats pour 2013

La même analyse conduite avec les données de 2013 ne fait ressortir que deux critères importants : la possession d'un permis de conduire et la longueur du déplacement. Ainsi, les déplacements faits par les détenteurs d'un permis de conduire sont classés dans la branche de gauche avec l'auto conducteur comme mode dominant à 75% (cette branche rassemble 93% des déplacements). Pour ceux qui ne possèdent pas de permis de conduire, c'est la distance qui est déterminante entre le choix de marcher ou prendre le transport en commun (comme mode dominant).

La Figure 28 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, en auto conducteur ou en transport en commun. Le premier critère de séparation est la possession d'un permis de conduire.

Le Tableau 19 montre que la majorité des déplacements auto passager et transport en commun sont prédits comme de l'auto conducteur. Le taux d'erreur est à 26,3 %.

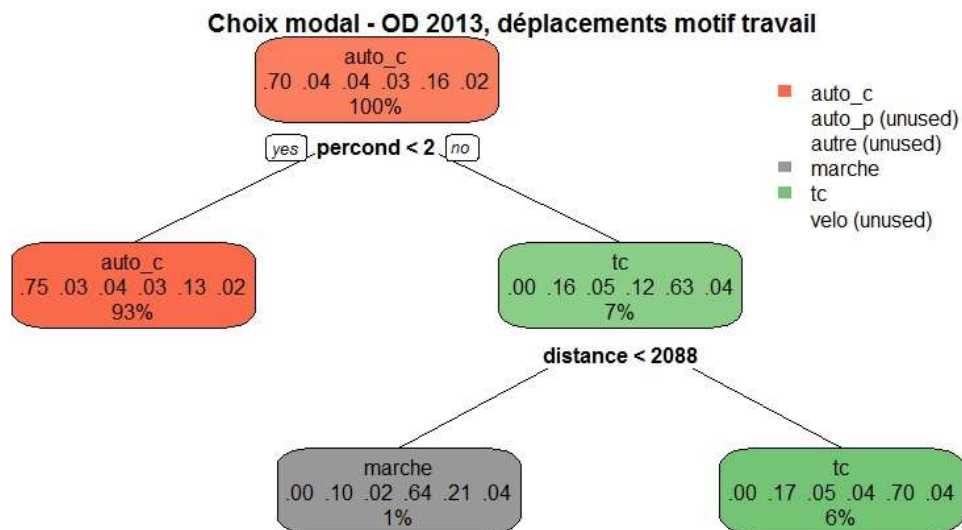


Figure 28. Arbre de classification, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

Tableau 19. Matrice de confusion, déplacements motif travail, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	68,9%	0	0	0,0%	0,0%	0
	auto_p	3,3%	0	0	0,1%	1,0%	0
	autre	4,5%	0	0	0,0%	0,3%	0
	marche	2,6%	0	0	0,6%	0,2%	0
	tc	12,3%	0	0	0,2%	4,2%	0
	velo	1,5%	0	0	0,1%	0,2%	0

2.9.4.5 Déplacements motif étude – ratios et distances seulement

Résultats de 2008

Les arbres sont repris ici pour les déplacements pour motif étude en incluant uniquement les ratios de compétitivité et la longueur des déplacements. Le premier critère de segmentation de l'arbre est la longueur du déplacement, avec un seuil de 1686 mètres. La marche est dominante (à 58% de part modale) pour les déplacements de moins de 1686 mètres (qui comptent pour 30% des déplacements). Lorsque la distance est supérieure, c'est le ratio de compétitivité du transport en commun qui permet de segmenter les déplacements : lorsque le ratio est inférieur à 3.5, le transport en commun domine alors que c'est le mode autre (qui inclue notamment le bus scolaire) qui domine lorsque le ratio est supérieur à 3.5.

La Figure 21 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, autre (bus scolaire par exemple) ou en transport en commun.

Le Tableau 20 montre que la majorité des déplacements auto conducteur sont prédits comme des déplacements autre, alors que les déplacements auto passager sont prédits à pied, autre ou transport en commun. Le taux d'erreur est à 49,3 %.

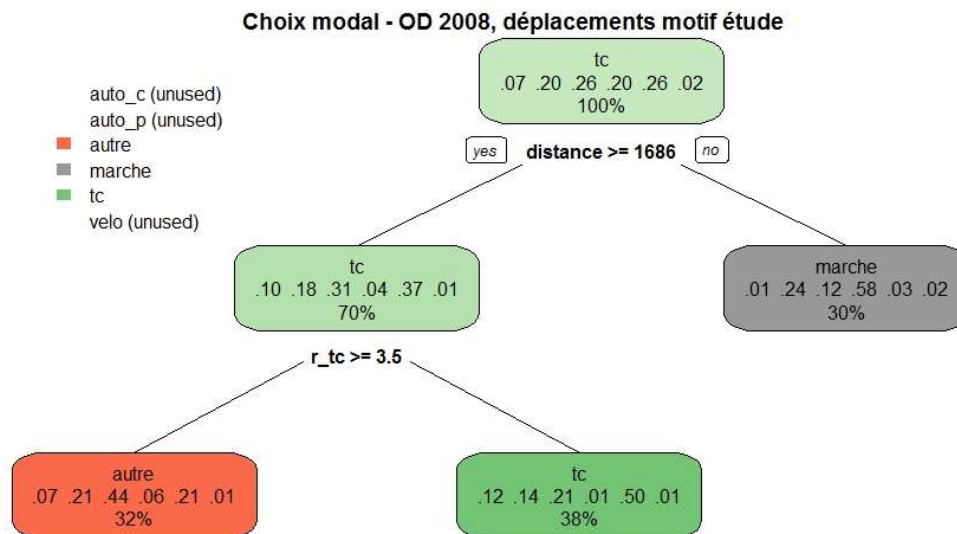


Figure 29. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2008

Tableau 20. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	0	0	3,8%	0,4%	9,2%	0
	auto_p	0	0	11,9%	13,7%	10,6%	0
	autre	0	0	26,2%	6,6%	15,7%	0
	marche	0	0	4,4%	35,6%	1,5%	0
	tc	0	0	13,5%	3,0%	38,2%	0
	velo	0	0	0,8%	1,2%	0,8%	0

Résultats pour 2013

Le même arbre construit pour 2013 fait ressortir des critères de segmentation différents. C'est encore la longueur du déplacement (à un seuil de 1822 mètres) qui agit comme première variable de segmentation mais c'est le ratio de compétitivité suivi d'un second critère de distance qui créent les sous-branches. Ainsi, le transport en commun est le mode dominant pour les déplacements de plus de 1822 mètres (part modale de 34% pour 81% des déplacements), dont le ratio de compétitivité de la marche est de moins de 5.2 (part modale de 38% pour 56% des déplacements) et dont la distance est supérieure à 4965 mètres (part modale de 47% pour 30% des déplacements). La marche est le mode de transport dominant pour les déplacements de moins de 1822 mètres avec une part modale de 53%.

La Figure 30 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, en autre ou en transport en commun.

Le Tableau 21 montre que la majorité des déplacements auto conducteur sont prédits comme des déplacements autre, alors que les déplacements auto passager sont prédits à pied ou autre. Le taux d'erreur est à 60,6 %.

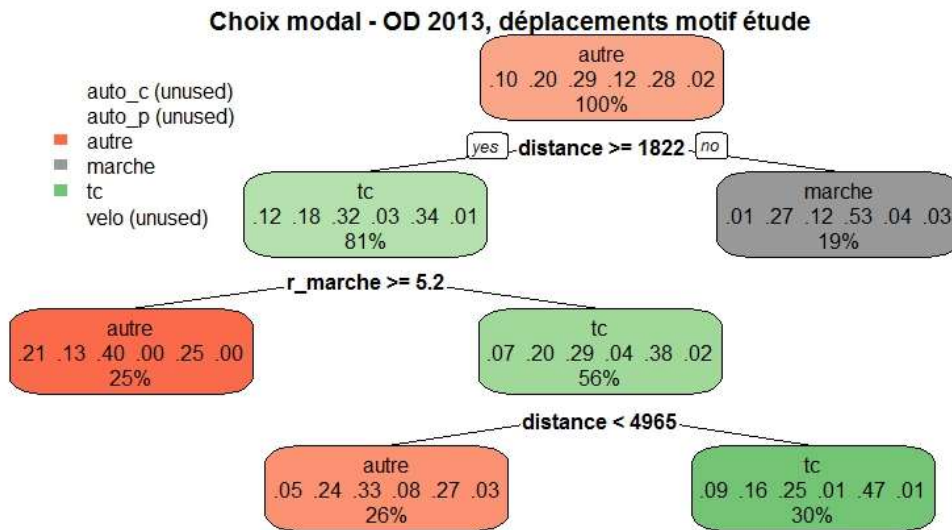


Figure 30. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2013

Tableau 21. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios et distances seulement, 2013

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	0	0	6,5%	0,2%	2,7%	0
	auto_p	0	0	8,5%	8,8%	4,4%	0
	autre	0	0	16,8%	2,4%	6,6%	0
	marche	0	0	1,7%	8,9%	0,1%	0
	tc	0	0	12,4%	4,7%	13,7%	0
	velo	0	0	0,7%	0,5%	0,3%	0

2.9.4.6 Déplacements motif étude – ratios, distances et attributs de la personne

Résultats pour 2008

L'ajout d'attributs de la personne dans les arbres des déplacements motif étude permet d'améliorer les performances générales. Dans ce cas, c'est l'âge qui s'ajoute à l'arbre de segmentation, suite à une première variable qui est encore la distance dans ce cas. Ainsi, la première variable de segmentation est la distance, à un seuil de 1686 mètres (comme dans le cas de l'arbre sans les attributs de la personne). Lorsque le déplacement est plus court que ce seuil, la marche est dominante avec une part modale de 58%. Pour les déplacements plus longs, le fait d'avoir 17 ans et plus fait en sorte que le mode dominant est le transport en commun avec une part modale de 56% sinon c'est autre mode qui est dominant (part modale de 48%); la part modale de l'auto passager est aussi nettement plus élevée pour les moins de 17 ans.

La Figure 31 montre que l'arbre est seulement capable de prédire des déplacements à pied, autre ou en transport en commun.

Le Tableau 22 montre que la majorité des déplacements auto conducteur sont prédits comme du transport en commun, alors que les déplacements auto passager sont prédits à autre ou à pied. Le taux d'erreur est à 45,7 %.

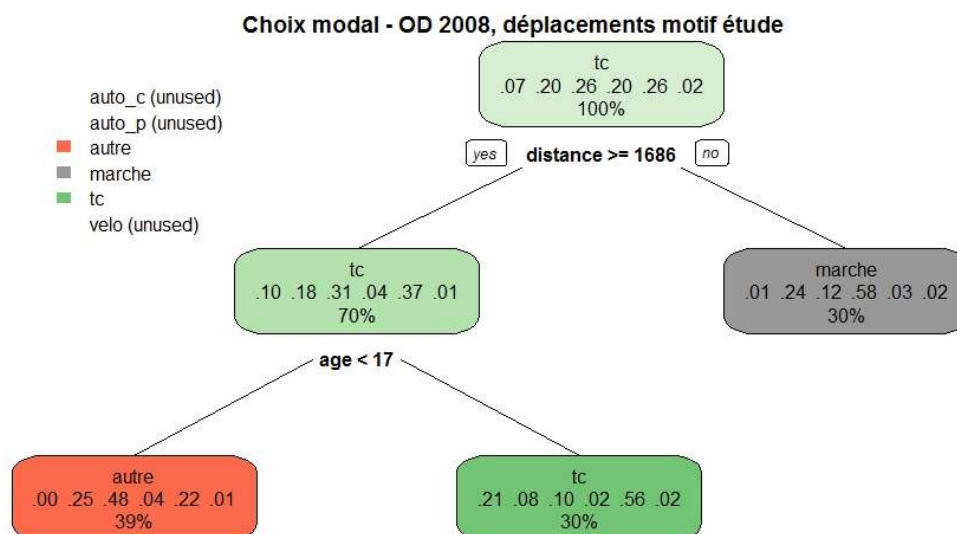


Figure 31. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

Tableau 22. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2008

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	0	0	0,2%	0,4%	12,0%	0
	auto_p	0	0	17,1%	12,8%	4,0%	0
	autre	0	0	33,6%	6,2%	5,6%	0
	marche	0	0	3,6%	33,3%	1,9%	0
	tc	0	0	15,4%	2,2%	33,1%	0
	velo	0	0	0,6%	1,1%	0,9%	0

Résultats pour 2013

La même approche est appliquée avec les données de 2013. Dans ce cas, c'est l'âge (pour le même seuil de 17 ans) qui est la première variable de segmentation. Pour les moins de 17 ans, c'est le mode autre qui est dominant avec une part modale de 39% et la marche devient dominante pour les moins de 17 ans lorsque la distance est inférieure à 1822 mètres avec une part modale de 51%. Pour les 17 ans et plus, c'est le transport en commun qui est dominant avec une part modale de 49%. En outre, le fait de ne pas posséder de permis de conduire augmente la part modale du transport en commun à 68% alors que lorsque les voyageurs possèdent un permis de conduire et que le ratio de compétitivité de la marche dépasse 7.2 c'est l'auto conducteur qui est dominant avec 56% de part modale. Dans ce cas, le ratio de compétitivité de la marche agit sans doute comme proxy de la distance.

La Figure 32 montre que l'arbre est capable de prédire tous les modes sauf l'auto passager et le vélo.

Le Tableau 23 montre que la majorité des déplacements auto passager sont prédits comme autres, alors que la majorité des déplacements en auto conducteur sont prédits en transport en commun. Le taux d'erreur est à 42,5 %.

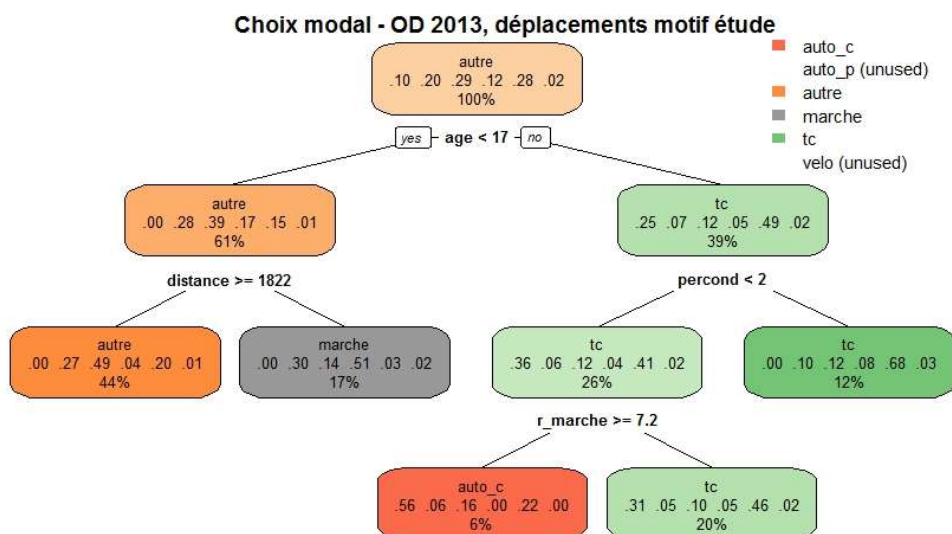


Figure 32. Arbre de classification, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

Tableau 23. Matrice de confusion, déplacements motif étude, ratios, distances et attributs de la personne, 2013

		Mode prédit					
		auto_c	auto_p	autre	marche	tc	velo
Mode observé	auto_c	3,4%	0	0,0%	0,0%	5,8%	0
	auto_p	0,2%	0	10,9%	4,8%	1,9%	0
	autre	0,7%	0	19,7%	2,3%	3,0%	0
	marche	0,0%	0	1,3%	7,8%	1,6%	0
	tc	1,3%	0	7,5%	0,1%	26,6%	0
	velo	0,0%	0	0,4%	0,1%	0,6%	0

2.9.4.7 Synthèse des résultats et discussion

Le Tableau 24 montre les taux d'erreur pour tous les arbres de classification qui ont été produits. Les taux d'erreurs sont presque toujours inférieurs pour l'enquête de 2013 comparativement à l'enquête de 2008. De plus, les arbres qui intègrent les attributs des personnes ont de plus faibles taux d'erreur. En ce qui concerne les motifs de déplacements, le motif travail offre un plus faible taux d'erreur qu'au global, alors que le motif étude offre un taux d'erreur plus élevé qu'au global.

Tableau 24. Taux d'erreur des différents arbres de classification

	2008		2013	
	ratios et distances seulement	ratios, distances et attributs de la personne	ratios et distances seulement	ratios, distances et attributs de la personne
Tous	45,0%	35,5%	42,4%	31,6%
Travail	34,8%	29,9%	30,5%	26,3%
Étude	49,3%	45,7%	60,6%	42,5%

Le Tableau 25 montre le premier critère qui a été utilisé pour segmenter les différents arbres de classification. Pour les arbres qui intégraient seulement les ratios de compétitivité ainsi que les distances de déplacement, c'est la distance de déplacement qui a été utilisée pour segmenter en premier, sauf dans l'arbre de 2013 pour le motif travail, avec une distance qui varie entre 1504 mètres et 1911 mètres. En ce qui concerne l'arbre de 2013 pour le motif travail, le deuxième critère de segmentation est une distance de 1866 mètres, ce qui est semblable aux autres arbres de ce type. Les distances pour le motif travail sont plus élevées que les distances pour le motif étude, probablement en raison de l'âge des personnes qui effectuent des déplacements pour leurs études.

En ce qui concerne les arbres qui intégraient les attributs de la personne, pour les arbres globaux ainsi que les arbres du motif travail, c'est la possession du permis de conduire qui constitue le premier critère de segmentation. Pour les arbres motif étude qui intègrent les attributs de la personne, c'est une distance de 1686 mètres qui constitue le premier critère de segmentation en 2008, et un âge de 17 ans qui constitue le premier critère de segmentation en 2013.

Tableau 25. Premier critère de séparation des différents arbres de classification

	2008		2013	
	ratios et distances seulement	ratios, distances et attributs de la personne	ratios et distances seulement	ratios, distances et attributs de la personne
Tous	distance = 1513 m	permis de conduire	distance = 1504 m	permis de conduire
Travail	distance = 1911 m	permis de conduire	ratio_marche = 4,2	permis de conduire
Étude	distance = 1686 m	distance = 1686 m	distance = 1822 m	age = 17 ans

Le Tableau 26 et le Tableau 27 présentent l'importance des différentes variables qui ont été utilisées pour faire la construction des arbres. Ici, la somme des importances de toutes les variables donne un total de 100 (parfois un peu plus ou un peu moins en raison des arrondis). Dans le Tableau 26, tous les arbres qui ont été produits avec les ratios de compétitivité ont établi la distance comme la variable la plus importante, à l'exception du motif travail en 2013. Le ratio t_c est la deuxième variable la plus importante en 2008, alors que ce sont les ratios de marche en 2013. Dans le Tableau 27, qui donne l'importance des variables pour les arbres qui ont utilisé les propriétés de la personne, c'est le permis de conduire qui est la variable la plus importante, sauf dans le cas du motif étude en 2008, pour lequel la distance est la variable la plus importante. La deuxième variable la plus importante est l'âge, sauf pour le motif travail. Le Tableau 26 et le Tableau 27 peuvent être mis en relation avec le Tableau 25. En effet, la variable qui est utilisée comme premier critère de séparation est souvent la plus importante, sauf dans le cas du motif étude en 2013 dans le Tableau 27.

Les taux d'erreur demeurent importants et c'est en grande partie lié au fait que c'est le mode dominant qui est prédit et que les feuilles ne sont pas pures (i.e. que même pour une feuille finale, il y a une forte distribution de modes pour des mêmes attributs de déplacement). Une approche probabiliste en fin de feuille (plutôt que de systématiquement attribuer le mode dominant)

permettra d'améliorer l'utilisabilité de l'arbre pour prédire le mode de transport. D'autres méthodes doivent être explorées.

Tableau 26. Importance des variables des différents arbres de classification, ratios et distances seulement

	distance	r_marche	r_velo	r_tc
Tous, 2008	58	11	5	26
Travail, 2008	49	13	9	29
Étude, 2008	51	10	5	34
Tous, 2013	45	28	26	1
Travail, 2013	26	36	33	5
Étude, 2013	44	26	25	5

Tableau 27. Importance des variables des différents arbres de classification, ratios, distances et attributs de la personne

	percond	age	distance	r_velo	r_marche	r_tc	genre
Tous, 2008	48	29	12	1	2	7	1
Travail, 2008	56	1	16	3	5	18	
Étude, 2008	14	24	33	3	6	20	
Tous, 2013	52	33	6	4	4	1	
Travail, 2013	83	1	8	3	4	1	
Étude, 2013	25	24	21	12	12	5	

2.10 Semaine synthétique de déplacements à l'aide d'une enquête OD

- Par : Hubert Verreault, Associé de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

2.10.1 Introduction

Les systèmes d'activités de la population varient habituellement en fonction des jours de la semaine. Malgré cela, plusieurs régions se basent sur un jour moyen de semaine afin de faire des analyses de mobilité. En général, les systèmes d'activités des personnes ou des ménages ne se déroulent pas nécessairement sur une seule journée, mais sur plusieurs jours, voire une semaine complète. Dans ce contexte, il est important de bien comprendre les systèmes d'activités de la population pendant la semaine, incluant la fin de semaine. De plus, plusieurs questions et enjeux peuvent être soulevés par rapport aux systèmes d'activités. Par exemple, sur combien de jours se déroulent habituellement les différentes activités de la population ? Combien de fois et lors de quels jours, consécutifs ou non, une activité est-elle effectuée pendant une semaine ? Ces questions illustrent les besoins grandissants en données sur la mobilité pour des besoins de planification. Également, certaines réponses à ces questions sont nécessaires afin d'évaluer les impacts de certaines stratégies comme la promotion du télétravail.

L'étude des systèmes d'activités au courant de la semaine demande habituellement des données portant sur plusieurs jours de la semaine, comme c'est le cas avec les enquêtes multi-jours. Plusieurs méthodes existent afin de recueillir ce type d'informations telles que les enquêtes GPS ou les outils plus standards de collecte de données (CATI ou CAWI). Cependant, ces enquêtes peuvent être assez dispendieuses, dépendant du nombre de jours enquêtés, ont des enjeux de fatigue du répondant, de refus mous et d'abandons et comptent possèdent habituellement des échantillons relativement petits. En plus de ces éléments, les enjeux rencontrés dans les enquêtes se basant sur une seule journée de collecte s'appliquent également aux enquêtes multi-jours (Stopher et al., 2007). Pour les raisons mentionnées précédemment, les enquêtes basées sur un jour moyen demeurent le standard et seulement quelques régions ont fait des enquêtes demandant des informations sur plusieurs jours de la semaine. Par ailleurs, au Québec, seules certaines régions (Montréal et Québec) possèdent des informations sur les jours de fin de semaine. De plus, cette collecte n'est pas nécessairement effectuée à chaque enquête.

Dans la région de Montréal, il n'y a aucune enquête permettant d'analyser avec un échantillon représentatif les systèmes d'activités de la population. Dans l'état actuel, il est donc impossible d'analyser les systèmes d'activités de la population. Bien que le jour moyen permette de calculer des indicateurs hebdomadaires de la mobilité en extrapolant les comportements observés sur 5 jours, cela rend impossible l'analyse de fréquences d'activités et de la variabilité intrapersonnelle des activités effectuées pendant la semaine.

Dans ce contexte, il est intéressant de se questionner sur la capacité des enquêtes Origine-Destination (OD) de la région de Montréal à estimer les systèmes d'activité de la population. L'objectif est donc d'utiliser les données d'enquête OD afin de créer une semaine synthétique d'activités, incluant le nombre et le type d'activité effectué à chacun des jours de la semaine.

2.10.2 Revue de littérature

Les enquêtes en transport sont traditionnellement basées sur le jour moyen de semaine (Stopher et al., 2007). Il est aussi commun que les modèles en transport, basés habituellement sur ces données, s'appuient également sur cette métrique (Habib et Miller., 2008). Habib et Miller (2008) mentionnent deux avantages de l'utilisation du jour moyen dans les modèles : la réduction des échantillons due à la collecte d'une seule journée et la réduction des besoins en calculs. Stopher

et al. (2007) souligne que les enquêtes se basant sur une seule journée de collecte exigent un échantillon volumineux afin d'illustrer la variabilité journalière des comportements de mobilité. Verreault et Morency (2011) ont montré que les grands indicateurs caractérisant la mobilité des individus varient pendant la semaine et la fin de semaine et que le jour moyen devrait être segmenté en plusieurs jours moyens selon le sujet d'intérêt. Schlich et Axhausen (2003) ont également démontré, en testant avec plusieurs mesures de variabilité, que les comportements de mobilité varient selon le jour de la semaine. Ils sont cependant plus stables lors des jours ouvrables de semaine.

En utilisant le jour moyen de semaine, il est supposé que les comportements d'activités sont répétitifs dans un court laps de temps. Kitamura et al. (2006) proposent une méthodologie pour l'étude de la périodicité des systèmes d'activités pendant la semaine. Il est difficile de déterminer le nombre de jours inclus dans le système d'activité d'une personne. Senbil et Kitamura (2009) suggèrent qu'une enquête d'une durée de deux semaines pour un individu est suffisante afin d'analyser la variabilité intrapersonnelle pour les activités irrégulières tandis qu'une durée d'une semaine est suffisante pour les activités régulières telles que le travail et l'étude. Schlich et Axhausen (2003) ont suggéré également qu'une période d'observation de deux semaines est nécessaire afin d'observer le système d'activité complet d'une personne.

Les enquêtes multi-jours sont utilisées habituellement pour l'analyse des systèmes d'activités. Ces enquêtes contiennent des informations supplémentaires, pour chacun des répondants, permettant l'analyse de la variabilité journalière des comportements de mobilité avec un échantillon plus petit qu'une enquête standard (Stopher et al., 2007). Pendyala et Pas (2000) mentionnent que les données provenant d'enquêtes multi-jours sont clairement utiles pour comprendre et modéliser les dynamiques complexes des comportements de mobilité. Jones et Clarke (1988) mentionnent que certains enjeux ne peuvent être étudiés avec le jour moyen de semaine, peu importe le type de données disponibles.

Même si le nombre d'enquêtes multi-jours est plus important qu'avant avec l'avènement des enquêtes basées sur le GPS et le téléphone cellulaire, elles sont minoritaires par rapport aux enquêtes collectant une seule journée d'informations. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène. Stopher et al. (2007) suggèrent que la fatigue du répondant et la baisse généralisée des taux de réponse des sondages expliquent pourquoi ce type d'enquête n'est pas plus utilisée. Richardson et al. (1995) ont également soulevé quelques problèmes affectant les enquêtes multi-jours : taux de réponse plus bas que les enquêtes traditionnelles et augmentation générale des biais. Schlich et Axhausen (2003) mentionnent que la quantité de travail demandé au répondant, spécifiquement pour les enquêtes n'ayant pas de composantes GPS, est une des difficultés pour la réalisation d'une enquête multi-jours. Ce phénomène peut s'accroître si l'enquête utilise un proxy. Ils mentionnent également qu'il faut faire attention au biais de sélection dans ce type de sondage, car un répondant ayant un intérêt pour la thématique pourrait avoir une probabilité plus grande de finaliser sa tâche. Stopher et Greaves (2010) soulèvent d'autres problèmes rencontrés dans les enquêtes multi-jours tel que l'oubli de certains déplacements et activités ou la copie par inadvertance d'activités sur d'autres jours de la semaine.

Plusieurs enquêtes multi-jours ont été effectuées dans les dernières décennies. Cependant, ces enquêtes ne sont habituellement pas récurrentes et ont habituellement un petit échantillon. Stopher et al. (2007) ont effectué une synthèse des enquêtes multi-jours (deux jours et plus) effectués entre 1971 et 2006. Les enquêtes suivantes sont mentionnées : Uppsala, Sweden (1973, 296 ménages, 35 jours), Reading (1970, 136 ménages, 7 jours), Dutch Panel (1984-1988, 1687-1928 ménages, 7 jours), German mobility panel (Depuis 1994, 750-800 ménages, 7 jours),

Lexington (1994, 100 personnes, 7 jours) et Mobidrive (1999, 139 ménages, 6 semaines). Toutes ces enquêtes sont caractérisées par un petit échantillon. Dans les dernières années, quelques expériences ont été effectuées avec l'aide des GPS et des téléphones cellulaires. Ces technologies permettent principalement de diminuer le fardeau du répondant. Sydney a utilisé une application pour cellulaire afin d'enquêter 857 répondants (Stopher et Greaves, 2010). 76% des répondants ont complété les 7 jours du sondage. La région de Victoria en Australie a inclus une composante GPS à son enquête habituelle afin de valider les résultats habituels. L'échantillon comporte 58 ménages qui ont déclaré leur mobilité pendant 7 jours (Stopher et Greaves, 2010). Les Pays-Bas, en 2001, ont effectué une enquête avec composante GPS. 1104 répondants ont complété le questionnaire s'étendant également sur 7 jours (Bohte et al., 2009).

La Ville de Montréal a effectué une enquête en 2016 nommée Trajet MTL. Les traces GPS de l'ensemble des déplacements des répondants ont été amassées pendant un certain nombre de jours. Un minimum de 25 déplacements devait être répertorié afin que le sondage soit considéré comme complété. En plus des traces GPS, le motif d'activité ainsi que le mode utilisé était demandé au répondant après chaque déplacement. Cependant, le recrutement n'était pas aléatoire et donc, l'échantillon n'est pas statistiquement représentatif de la population. Il est également impossible de faire de l'inférence pour obtenir les comportements de mobilité de l'ensemble de la population de référence. Un peu plus de 10 000 personnes ont téléchargé l'application nécessaire pour l'enquête (Itinerum (Patterson et Fitzsimmons, 2016)).

Bien que plusieurs modèles existent afin de modéliser les systèmes d'activités journaliers (CEMDAP (Bhat et Singh, 2000), Famos (Pendyala et al., 2005), TASHA (Roorda et al., 2008)), and Albatross (Arentze et Timmermans, 2000) d'une population, plusieurs s'intéressent de plus en plus à modéliser une semaine d'activités. Bifulco et al. (2010) proposent un modèle d'activités basé sur 5 composantes qui sont appliquées de façon subséquent. Ces composantes couvrent la modélisation du nombre d'activités par ménage pendant la semaine (WHAM), du nombre d'activités par ménage pour chaque jour de la semaine (DHAM), du nombre d'activités par personne (DIALM), des systèmes d'activités par personne (DIAPM) et des chaînes d'activités. Ce modèle a été calibré à l'aide d'un échantillon de 100 ménages recueillis à Naples. Habib et Miller (2009) ont utilisé un modèle basé sur la maximisation de l'utilité afin de créer des programmes d'activités journaliers. Le modèle peut incorporer les dynamiques entre les jours en spécifiant comme données entrantes le nombre d'heures de travail et la durée totale en activité lors du jour précédent.

L'imputation du nombre et du type d'activités pour une personne est basée habituellement sur l'hypothèse qu'une personne a des comportements de mobilité similaires à des personnes possédant des caractéristiques sociodémographiques similaires. Dans la littérature, plusieurs auteurs ont proposé des typologies de ménages et de personnes afin de classifier les personnes avec des comportements de mobilité similaires. Les variables utilisées dans les classifications comprennent minimalement l'âge, le genre et le type de ménage. Cependant, plusieurs autres variables caractérisant les ménages, les personnes ou les interactions entre les membres d'un ménage sont également proposées. Désilets (2012) a utilisé la taille du ménage, la présence d'enfant ainsi que l'occupation principale de la personne afin de classifier les ménages. Bernard et al. (2011) ont proposé une typologie de ménage basée sur plusieurs variables comprenant la taille du ménage, le nombre d'adultes dans celui-ci, le nombre de générations présent dans le ménage et la notion de couple. Limtanakool et al. (2006) proposent une typologie basée sur la taille du ménage, le nombre de travailleurs et la présence d'enfants de moins de 12 ans. Bifulco et al. (2010) ont utilisé une typologie de ménages basée sur le nombre et l'âge des travailleurs, le

nombre et l'âge des enfants, le revenu du ménage, la taille du ménage et la motorisation de celui-ci. Srinivasan et Bhat (2005) proposent de classer les ménages en 4 types : ménage avec un travailleur et aucun enfant, ménage avec deux travailleurs et aucun enfant, ménage avec un travailleur avec au moins un enfant et ménage avec plus de deux travailleurs avec au moins un enfant.

2.10.3 Système d'information

Les données utilisées dans le cadre de cette étude proviennent de l'enquête OD de Montréal. Ces enquêtes collectent tous les déplacements effectués par les membres d'un ménage pour un jour de semaine. Les données de 2008 sont utilisées dans cette étude, car elles comprennent un échantillon portant sur les jours de fins de semaine en plus de celui portant sur les jours ouvrables de semaine. Les taux d'échantillonnage sont respectivement de 4.0% (66 124 ménages) et de 0.66% (10 971 ménages) pour les échantillons de semaine et de fin de semaine. La méthodologie développée dans cette étude demande de segmenter les échantillons selon le jour de semaine. Au total, 7 échantillons représentant chaque journée de la semaine sont générés. Le Tableau 28 illustre les taux d'échantillonnage et le nombre de ménages disponibles pour chaque journée de la semaine.

Tableau 28. Taux d'échantillonnage et nombre de ménages disponibles selon le jour de la semaine

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Taux d'échantillonnage	0.74%	0.82%	0.80%	0.83%	0.81%	0.33%	0.34%
Ménages échantillonnés	12 283	13 547	13 176	13 660	13 458	5 417	5 554
Personnes échantillonnées	29 309	32 251	31 082	32 619	31 459	12 707	13 182

Tel que mentionné précédemment, les taux d'échantillonnage pour les journées de semaine sont plus élevés que ceux de la fin de semaine. Malgré la segmentation de l'échantillon en 7 échantillons distincts, le nombre de ménages disponibles demeure élevé pour chaque jour.

Pour fins de comparaison et de validation des résultats, des données de l'Enquête Sociale Générale (ESG) de 2010 de Statistique Canada qui se concentre sur l'utilisation du temps pendant la semaine sera utilisée. Cette enquête est effectuée en CATI et le répondant est choisi aléatoirement parmi les membres du ménage appelé. Seuls les répondants habitant dans les RMR du Québec sont considérés dans le cadre de cette analyse. De plus, afin d'être cohérent avec l'enquête OD, seuls les répondants du mois de septembre à décembre sont considérés. L'échantillon final comporte 1 038 répondants.

2.10.4 Méthodologie

Cette section présente la méthodologie développée pour synthétiser une semaine d'activités pour chaque personne échantillonnée de l'enquête OD. Afin d'obtenir une semaine complète d'activités pour une personne, les systèmes d'activités pour les jours autres que celui qui a été déclaré doivent être imputés. Pour cet exercice, le nombre, le type et la durée des activités pour chaque journée de la semaine seront imputés. L'objectif est d'obtenir à la fin de la procédure un système d'activités hebdomadaire pour chaque personne de l'échantillon.

Afin de faciliter la compréhension de la méthodologie, certains termes doivent être définis. Un récepteur correspond à une personne dont le système d'activités pour une journée spécifique sera imputé. Le donneur correspond à une personne dont le système d'activité déclaré sera copié pour un récepteur. L'imputation du nombre, du type et des durées d'activités pour chaque jour de la semaine se base sur deux principales hypothèses :

1. Les personnes ont des systèmes d'activités similaires à d'autres personnes du même type.
2. Le degré de similarité des systèmes d'activités entre deux personnes du même type diminue en fonction de la distance entre leur domicile.

Ces hypothèses demandent de développer une typologie de personnes basée sur les caractéristiques sociodémographiques des ménages et de ses membres. Les variables utilisées sont la taille du ménage, la présence d'enfant dans le ménage, l'âge (0-5 ans, 5-14 ans, 15-24 ans, 25-39 ans, 40-64 ans, 65 ans et plus), le genre et l'occupation principale de la personne. Au total, 180 types uniques de personnes sont obtenus.

Afin de considérer la seconde hypothèse, la probabilité qu'un donneur soit tiré est pondérée en fonction de l'inverse de la distance (IDW) entre son domicile et celui d'un récepteur. Afin de s'assurer qu'un donneur habitant dans le même bâtiment qu'un récepteur ne soit automatiquement choisi, une probabilité uniforme est appliquée pour une distance inter-domicile de moins de 100 m. Pour le moment, le choix de cette fonction de probabilité est arbitraire. Une analyse de sensibilité devra être effectuée afin de connaître les impacts de ce choix.

2.10.4.1 Procédure d'imputation

La procédure d'imputation permet d'attribuer un système d'activités à un récepteur pour un jour spécifique. Ce processus doit être fait de nouveau pour chaque journée à imputer. Pour chaque jour, le système d'activités de la personne est imputé à partir d'un seul donneur. Cette technique permet de prendre en considération les interactions entre les activités d'une personne pendant une même journée.

La procédure suivante est donc appliquée pour chaque personne disponible dans l'enquête OD.

- Pour chaque personne (récepteur) :
 - Pour chaque jour (J) à imputer :
 - Création d'une liste de toutes les personnes du même type dans l'échantillon du jour J pour obtenir les donneurs potentiels ;
 - Estimation de la distance entre le récepteur et tous les donneurs potentiels ;
 - Estimation de la probabilité d'être sélectionnée pour chaque donneur ;
 - Sélection aléatoire du donneur et allocation de son système d'activité au récepteur.

Cette procédure est également illustrée à la Figure 33.

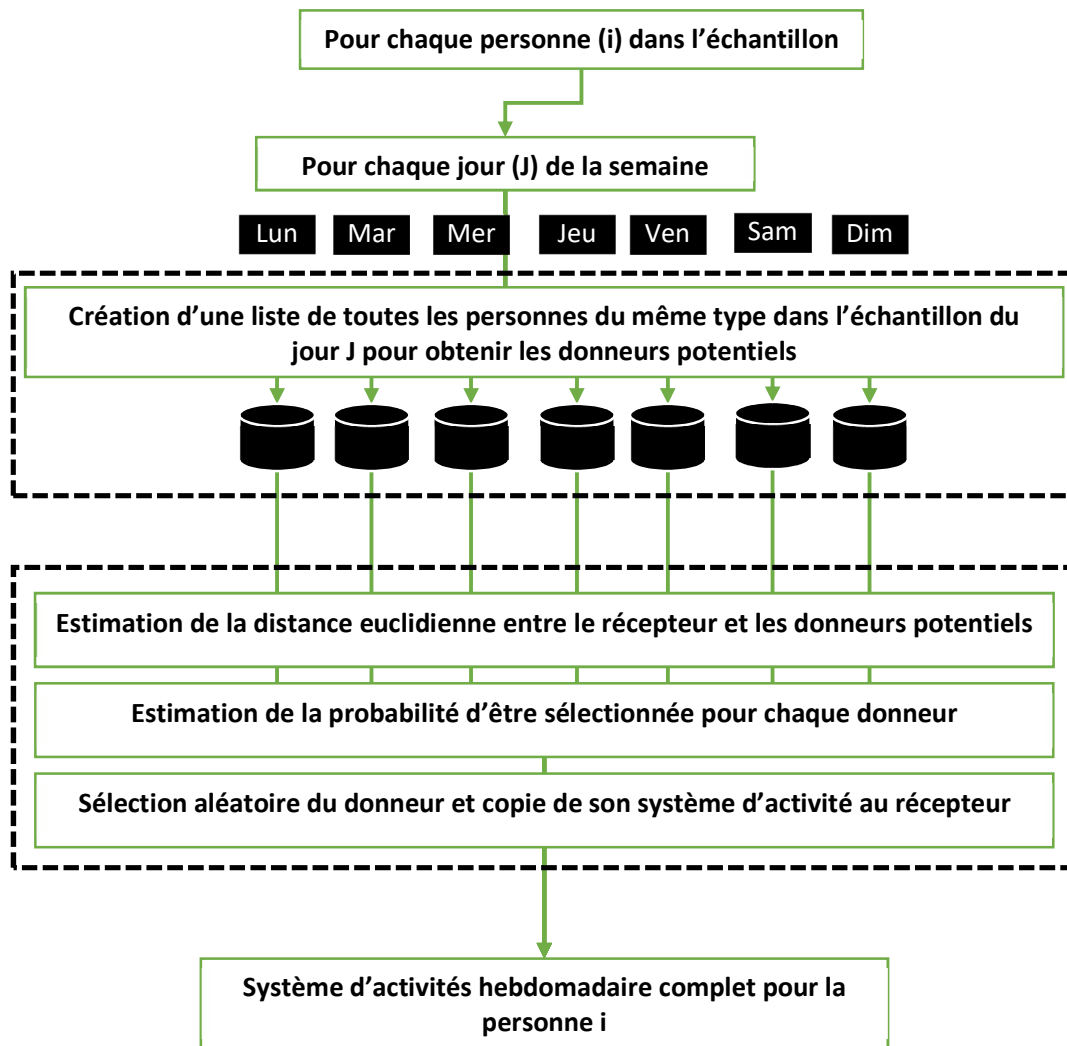


Figure 33. Procédure d'imputation d'un système d'activités hebdomadaire

À la suite de la procédure, nous obtenons une base de données comprenant toutes les activités de la semaine pour l'ensemble de l'échantillon disponible (4.66%). La Figure 34 illustre un exemple de résultats obtenus ainsi que la position géographique des donneurs.

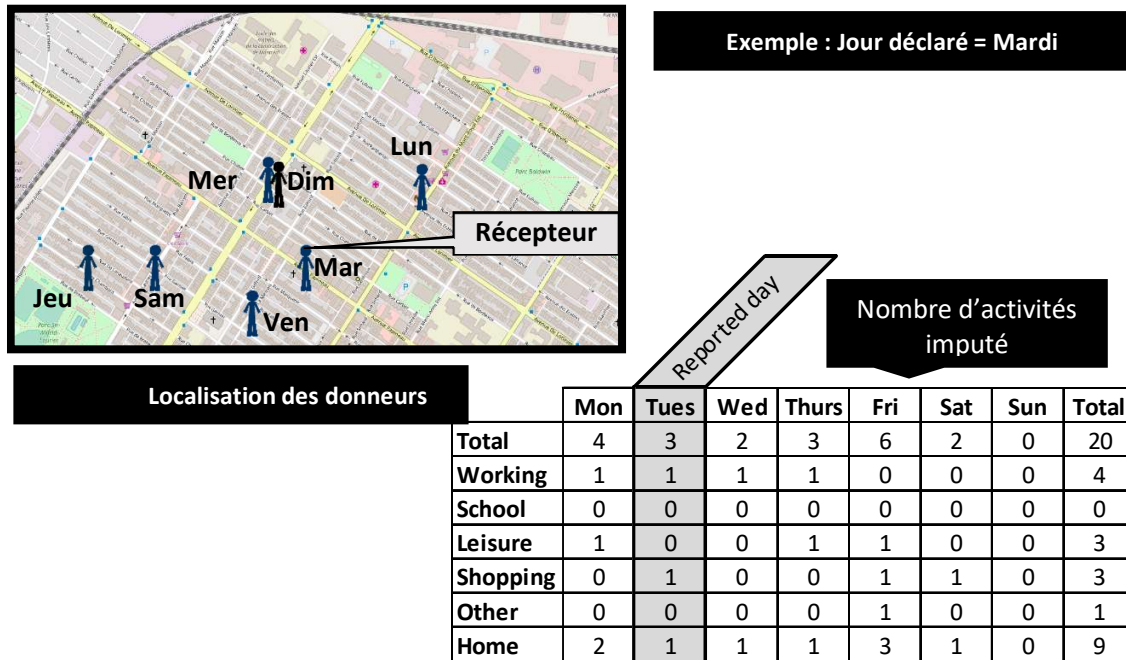


Figure 34. Exemple de l'imputation du système d'activités pour une personne

La base de données finale obtenue permet d'estimer plusieurs indicateurs basés sur une semaine moyenne d'activités avec un niveau de résolution similaire qu'avec l'enquête OD standard.

2.10.5 Résultats

Avec la base de données obtenue de la méthodologie précédente, plusieurs types d'analyses peuvent être effectués. La section suivante présente quelques exemples de résultats qu'il est possible d'obtenir à partir de la base de données imputée. Deux types de résultats sont présentés. Premièrement, des indicateurs basés sur une semaine moyenne d'activités sont présentés. Par la suite, les fréquences journalières des activités seront étudiées.

Le Tableau 29Tableau 28 présente le nombre d'activités et la durée totale en activité par semaine selon le motif d'activité.

Tableau 29. Nombre d'activités et durée totale en activité pendant la semaine selon le motif d'activité

Motif	Déplacements	Durée totale en activité (heures)	Durée moyenne par activité (heures)
Travail	2.16	17.6	8.2
Étude	1.08	7.9	7.4
Loisir	1.43	4.8	3.3
Magasinage	1.39	2.5	1.8
Autre	1.45	2.5	1.7
<i>Domicile</i>	<i>6.10</i>	<i>132.7</i>	-
<i>Hors du domicile</i>	<i>7.51</i>	<i>35.3</i>	<i>4.7</i>

Au total, une personne typique effectue 13.6 déplacements pendant une semaine et passe 35.3 heures en activité hors du domicile. En moyenne, une personne passe également 132.7 heures à son domicile, ce qui représente 79% de la semaine. Ces résultats varient cependant grandement

selon l'occupation principale de la personne. Le travail et l'étude sont les deux activités principales pendant la semaine avec 17.6 et 7.9 heures respectivement par semaine. La Figure 35 illustre la durée totale en activité hors-domicile selon le groupe d'âge.

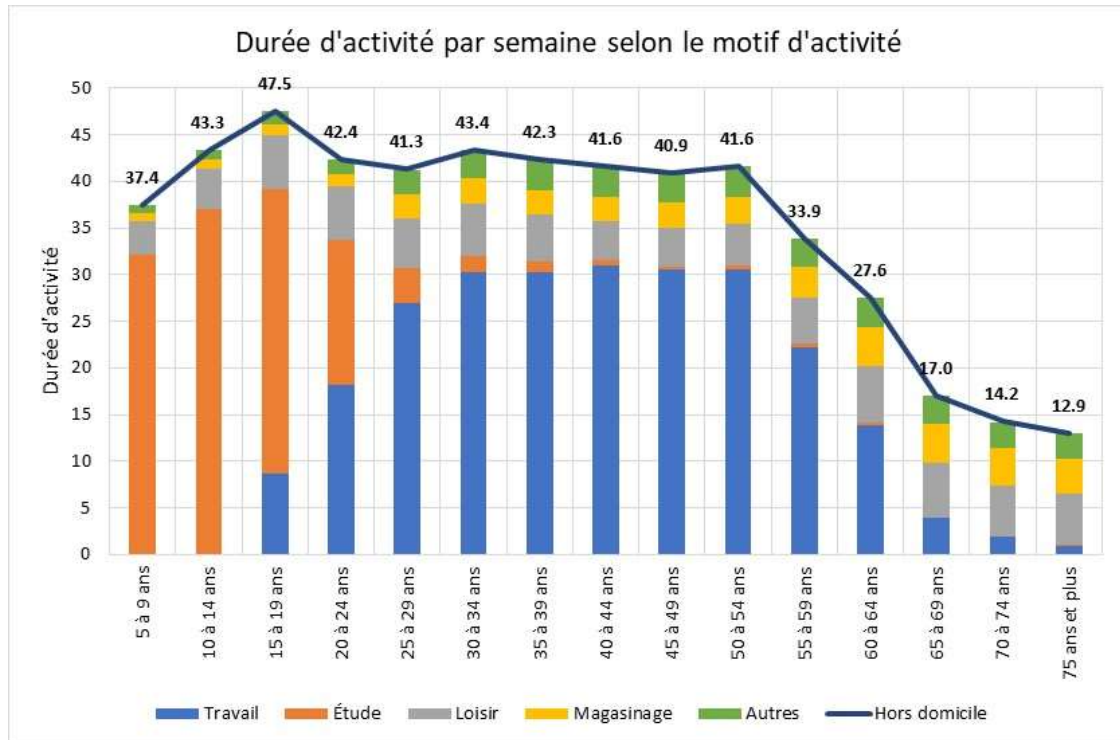


Figure 35. Durée moyenne en activité hors-domicile par semaine selon le motif d'activité

Les personnes entre 15 et 19 ans sont celles qui passent le plus de temps à l'extérieur de leur domicile pendant la semaine. Il est à noter que ce groupe d'âge possède également le plus bas pourcentage de personnes immobiles pendant les jours de semaine avec 8.2%. La durée totale en activité reste stable entre 20 et 55 ans. Cependant, la distribution des activités est différente pour les 20 à 30 ans. La durée totale en activité loisir et magasinage augmente à partir de 55 ans.

La Figure 36 présente le nombre de jours avec au moins un déplacement pendant la semaine selon le groupe d'âge. Au global, 0.1% de la population âgée de 5 ans et plus est immobile pendant la semaine complète tandis que 24.5% de la population est active tous les jours de la semaine. Néanmoins, il est à souligner que l'enquête OD se concentre sur les ménages privés et néglige dans la plupart des cas les logements collectifs.

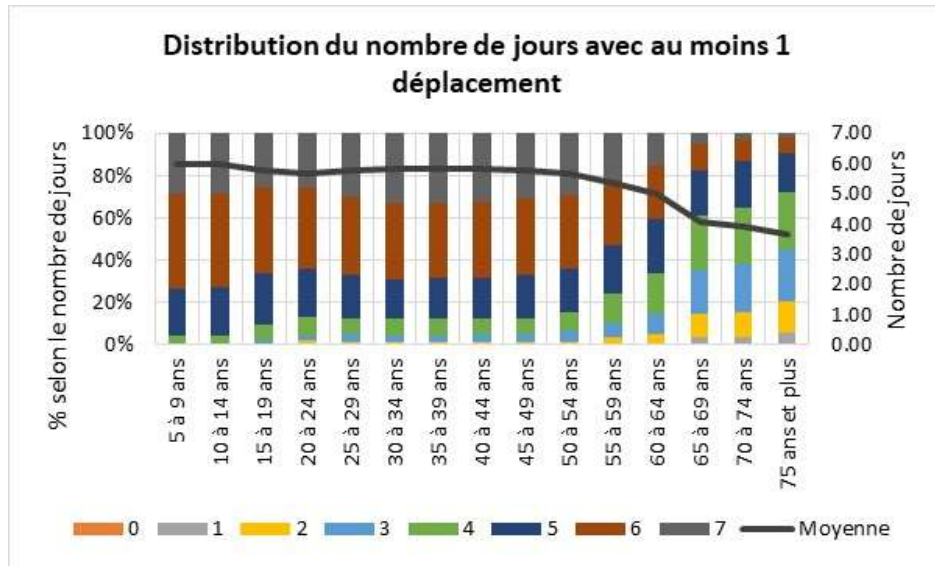


Figure 36. Nombre de jours avec au moins un déplacement

La Figure 37 présente le nombre de jours avec au moins un déplacement travail selon le groupe d'âge. En moyenne, la population travaille 2.2 jours par semaine tandis que les 20 à 65 ans travaillent en moyenne 3 jours par semaine. Chez les travailleurs à temps plein, ils effectuent au moins une activité travail 4.1 jours par semaine. En considérant l'ensemble de la population, 0.2% effectuent des déplacements pour le travail 7 jours par semaine tandis que 38.2% n'effectuent aucune activité pour le travail pendant la semaine. Cependant, en incluant seulement les personnes de 20 à 64 ans, le pourcentage des personnes n'effectuant aucune activité travail pendant la semaine est de 18.5%.

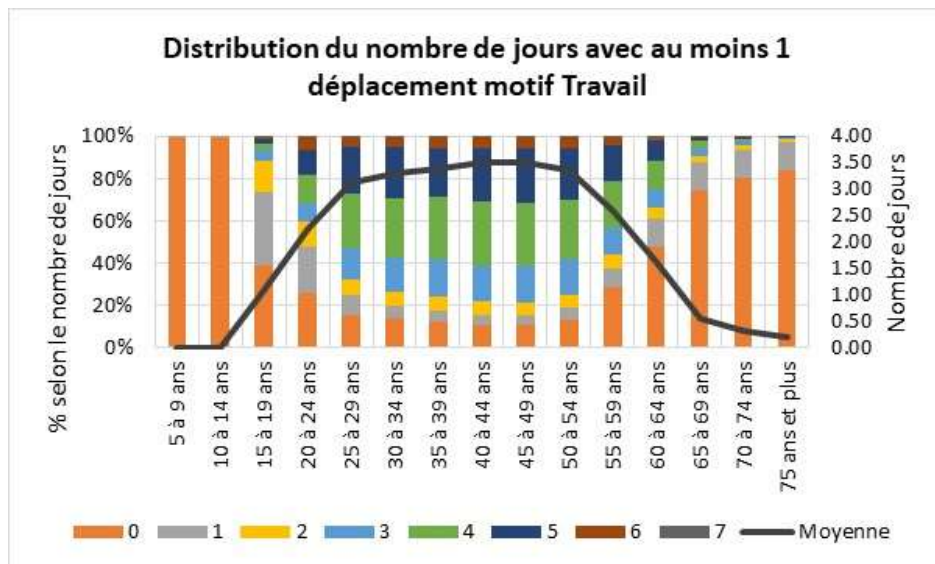


Figure 37. Nombre de jours avec au moins un déplacement travail

La Figure 38 présente le nombre de jours avec au moins un déplacement magasinage. Trois plateaux distincts sont observés selon le groupe d'âge. Ces plateaux correspondent aux personnes de 5 à 24 ans, 25 à 54 ans et 60 ans et plus qui concentrent leurs activités magasinage sur

respectivement 0.50, 1.32 et 1.86 jour par semaine. En considérant l'ensemble de la population, 29.6% n'effectue aucun magasinage pendant la semaine.

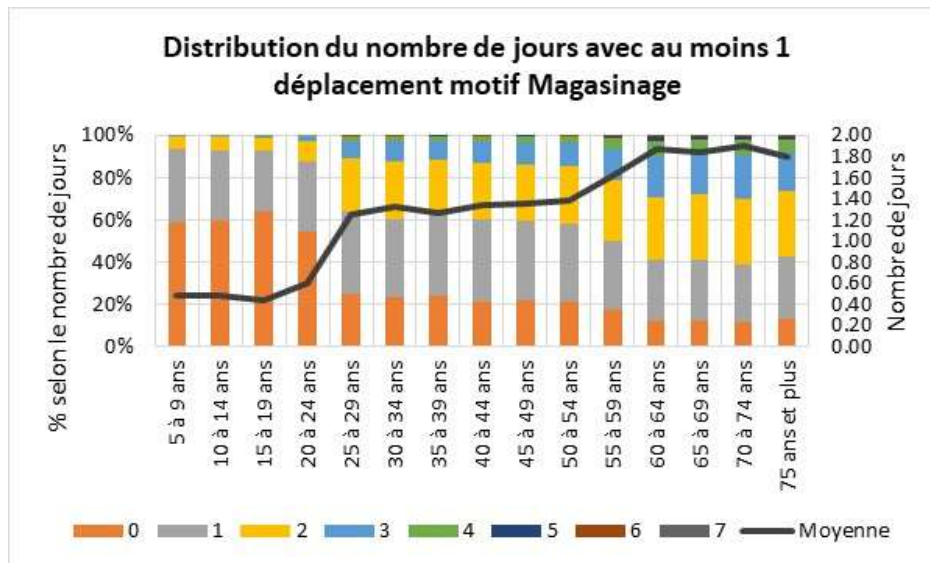


Figure 38. Nombre de jours avec au moins un déplacement magasinage

Les figures précédentes permettent d'analyser la fréquence de certaines activités pendant la semaine pour une personne. Cependant, certaines activités telles que le magasinage sont partagées entre les membres du ménage. Par exemple, une personne spécifique peut effectuer l'ensemble des activités magasinage de son ménage tandis que les autres membres vont se concentrer sur d'autres types d'activités. Le Tableau 30 présente le pourcentage des ménages avec aucune activité d'un certain type pendant la semaine.

Tableau 30. Pourcentage des ménages avec 0 déplacement d'une certaine activité pendant la semaine

Taille du ménage	Âge moyen du ménage	Pourcentage des ménages avec 0 déplacement d'une certaine activité pendant la semaine				
		Travail	Étude	Loisir	Magasinage	Autre
1	59.0	45.9%	91.5%	15.6%	14.0%	34.1%
2	56.8	22.9%	79.7%	5.8%	4.9%	11.1%
3	27.5	3.6%	30.6%	3.9%	4.6%	3.5%
4 et plus	29.2	2.2%	4.6%	1.4%	3.1%	0.8%

En général, la probabilité d'effectuer au moins un déplacement pour un ménage augmente avec la taille du ménage. La probabilité de ne faire aucune activité étude pendant la semaine est plus élevée que pour les autres motifs d'activité. Bien entendu, ce type d'activité est reliée directement avec la présence d'enfants à l'intérieur du ménage. Cela explique également la faible probabilité pour les ménages de 3 personnes et plus de n'effectuer aucune activité pour motif autre pendant la semaine.

L'absence dans la région de Montréal d'une enquête multi-jours rend difficiles la comparaison et la validation des résultats obtenus. La seule information plus ou moins comparable disponible

provient de l'enquête ESG de Statistique Canada. Cette enquête permet d'estimer la durée totale en activité pour le travail pendant la semaine ainsi que la durée des déplacements associés à ces activités. Bien que la structure des deux enquêtes soit différente, il est possible de choisir des groupes de comparaison similaires. Les données utilisées comprennent uniquement les travailleurs à temps plein dans l'enquête OD et les personnes ayant déclaré le travail comme occupation principale dans l'enquête ESG.

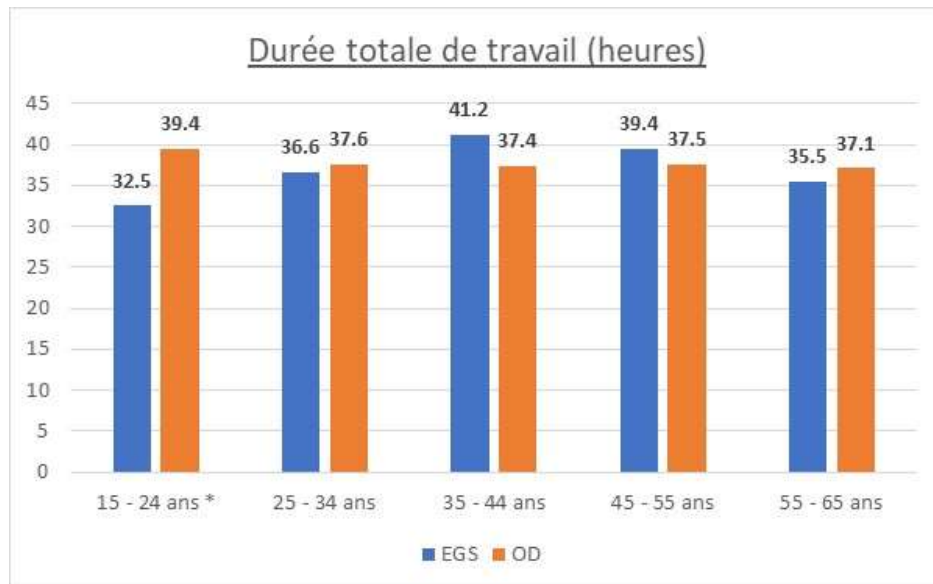


Figure 39. Comparaison de la durée totale d'activité travail entre l'enquête OD et l'enquête ESG

Des différences sont observées pour l'ensemble des groupes d'âge. Pour les personnes âgées entre 15 et 24 ans, la durée totale d'activité pour le travail est de 6.9 heures de plus dans l'enquête OD. Cet écart peut cependant s'expliquer partiellement par l'utilisation des personnes de 16 ans et plus dans l'enquête OD, une personne de moins de 16 ans ne pouvant être un travailleur à temps plein. Bien que les différences sont souvent à l'avantage de l'enquête ESG, il est difficile de tirer des conclusions. Bien que l'enquête ESG ne permet pas, dans son état actuel, d'être utilisée afin de calibrer la méthodologie préposée, cela permet de valider que cette méthodologie génère des résultats qui semblent s'approcher de la réalité.

2.10.6 Conclusion

Cette section a présenté une méthodologie permettant de générer une base de données équivalente aux enquêtes multi-jours afin d'analyser les systèmes d'activités de la population. La méthodologie est basée sur des hypothèses simples, qui doivent encore être calibrées pour la région de Montréal. De plus, cette méthodologie est facilement reproductible. La base de données obtenue permet d'analyser les systèmes d'activités des personnes avec des indicateurs basés sur une semaine moyenne d'activité ou des indicateurs de types fréquentiels.

2.11 Perspectives de recherche en économie des transports

- Par : Brigitte Milord, Associée de recherche
- Contexte : Chaire Mobilité

2.11.1 Constats relatifs au cadre d'analyse avantages-coûts

Pour être approuvé, un projet d'investissement doit suivre un cheminement en deux étapes au Québec (Conseil du trésor du Québec, 2016; Gouvernement du Québec, 2018):

- La première étape est l'élaboration de la fiche d'avant-projet, présenté par le ministre au Secrétariat du Conseil du Trésor, qui contient : une description sommaire des besoins, la démonstration que seule une solution d'infrastructure publique peut y répondre, une estimation préliminaire des coûts et des solutions de financement ainsi qu'une estimation préliminaire des coûts pour l'élaboration du dossier d'opportunité.
- La seconde étape est la gestion du projet. Le gestionnaire désigné du projet doit réaliser les activités relatives à la gestion et à la maîtrise du projet afin d'assurer la livraison d'une infrastructure publique de qualité qui répondra aux besoins exprimés, tout en respectant le coût, la portée et l'échéancier convenus. Subséquemment à l'autorisation du Conseil des ministres de mettre à l'étude le projet envisagé, le gestionnaire de projet doit élaborer un dossier d'opportunité. Celui-ci doit permettre d'apprécier la pertinence du projet et de recommander la meilleure option à long terme. L'évaluation des options doit notamment aborder l'analyse avantages-coûts.

2.11.1.1 Enjeux

L'analyse avantages-coûts est une méthode d'évaluation de la rentabilité sociale d'un projet d'infrastructure ou d'une politique publique. La rentabilité sociale diffère de la rentabilité privée (profit) en ce sens qu'elle prend également en considération les impacts qui améliorent ou détériorent le bien-être du point de vue de la société, notamment en ce qui a trait à l'environnement, la santé et la sécurité. Cette méthode d'évaluation est donc utile pour éclairer la prise de décision lorsqu'un investissement exige des fonds publics. Au Québec, le guide du ministère des Transports du Québec s'inspire grandement du guide de Transport Canada, datant de 1994, et du guide du Conseil du Trésor du Canada, dont la dernière version date de 2006 (Desrosiers, 2001; Gouvernement du Canada, 2018; Sambe, Doyon et Beaulieu, 2016; Treasury Board of Canada, 2007).

Le cadre d'analyse avantages-coûts du MTQ permet actuellement de comparer plusieurs versions d'un même projet, mais ne semble pas adapté pour effectuer une comparaison directe entre différents modes de transport et ce, pour au moins trois raisons:

- Une grande part des bénéfices d'un projet de transport vient des économies de temps. Or les paramètres suggérés tendent à favoriser les conducteurs. À titre d'exemple, le Guide recommande d'utiliser « 50 % de la valeur du salaire médian pour les conducteurs et 35 % pour les passagers » (Sambe et al., 2016). Une voie réservée générerait ainsi moins de bénéfices qu'un élargissement autoroutier.
- Les paramètres suggérés tendent également à favoriser les travailleurs en accordant une valeur moindre pour les motifs autres que pour le navettage, incluant le motif étude. Sur le plan de l'équité, l'accessibilité procurée à des personnes qui n'ont pas la

capacité physique ou financière de se déplacer autrement n'est donc pas prise en compte.

- Les analyses coûts-bénéfices excluent finalement les impacts économiques, c'est-à-dire les retombées locales en termes d'emplois, de salaires, de PIB et de revenus fiscaux. Le justificatif est que les ressources financières et humaines auraient pu être utilisées autrement en l'absence du projet. Ceci est tout à fait juste. Cependant, il est important de reconnaître que les projets de transport ont des impacts sur le développement résidentiel et commercial et que ces impacts influencent la résilience à long terme des infrastructures (notamment à travers la demande induite) ainsi que leurs bénéfices en termes de temps économisé, de vies sauvées et d'émissions de GES. Pour le moment le Guide présume que la demande de transport est constante.

Le cadre d'analyse actuel ne tient pas non plus explicitement compte des cibles gouvernementales, notamment celles de la Politique de mobilité durable 2030 (Ministère des transports, 2018):

- Diminution de 20 % de la part des déplacements en auto solo à l'échelle nationale
- 70 % de la population ait accès à au moins quatre services de mobilité durable
- Réduction de 20 % du temps de déplacement moyen entre le domicile et le travail
- Réduction de 25 % du nombre d'accidents mortels et avec blessés graves
- Réduction de 40 % de la consommation de pétrole dans le secteur des transports
- Réduction de 37,5 % des émissions de GES
- 15 G\$ de ventes annuelles pour le secteur québécois du transport terrestre

2.11.2 Questions de recherche

Les méthodes d'évaluation de projet ne semblent plus nécessairement répondre de manière satisfaisante à leur objectif premier, qui est de favoriser les bons choix d'investissement du point de vue de la société. Une mise à jour semble d'autant plus urgente alors que les discussions autour de projets tels que le 3e lien à Québec ou le prolongement de l'A19 s'intensifient. Aussi, si la révision du cadre d'analyse avantages-coûts semble être une priorité, il apparaît également important de questionner la complémentarité d'autres outils d'évaluation, tel que les analyses multicritères, de même que les exigences du cadre réglementaire dans lesquels ces outils sont utilisés. Cette réflexion s'inscrit directement dans les travaux de la Chaire qui vise à évaluer le niveau durabilité des plans, projets et politiques de transport et qui se sont traduits, dans les dernières années, par l'articulation de différents indicateurs couvrant les trois sphères du développement durable.

Il est important de spécifier que les problèmes énoncés ne sont pas propres au Québec. Le caractère souvent partial des paramètres choisis (ou dicté par la disponibilité des données ou les méthodes usuelles) et les difficultés de comparer objectivement plusieurs modes de transport ont été discutés abondamment ces dernières années (International Transport Forum, 2011). Dans certaines juridictions, où ces outils sont utilisés de manière plus systématique et transparente depuis de nombreuses années, les guides et les pratiques ont fait l'objet d'importantes révisions. On peut penser notamment à l'Australie, à la Nouvelle-Zélande, au Royaume-Uni et à la Commission européenne (Couture, Saxe et Miller, s.d.; Department of Transportation of UK, 2018; NZ Transport Agency, 2013; OECD, 2017; Sartori et Europäische Kommission, 2015; Transport and Infrastructure Council of Australia, 2018; Venables, s.d.). L'Ontario a elle aussi mise à jour ses

pratiques et enrichi son processus réglementaire ces dernières années afin de tenir compte plus adéquatement des avantages économiques, sociaux et environnementaux procurés par les transports collectifs et actifs (Metrolinx, 2019; MTO, 2017). Il semble là y avoir matière à s'inspirer.

La Chaire mobilité se penchera sur ces questions à travers une revue des pratiques internationale en matière d'évaluation des projets en transport et articulera les options les plus prometteuses pour réviser le cadre d'évaluation.

3 Rayonnement

3.1 Publications (2018)

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

Alizadeh, H, Bourbonnais, PL, Morency, C., Farooq, B., Saunier, N. (2018). An online survey to enhance the understanding of car drivers route choices, *Transportation Research Procedia* 32, 482-494.

Wielinski, G., Trepanier, M., Morency, C., Habib, K.N. (2018). Comparing multiple data streams to assess free-floating carsharing use, *Transportation Research Procedia* 32, 617-626.

Bourbonnais, PL, Morency, C. (2018) A robust datawarehouse as a requirement to the increasing quantity and complexity of travel survey data, *Transportation Research Procedia* 32, 436-447.

Habib, KN, Miller, EJ, Srikukenthrian, S, Lee-Gosselin, M., Morency, C., Roorda, MJ, Shalaby, A. (2018). TTS2. 0: A research and development (R&D) project on passenger travel survey methods, *Transportation Research Procedia* 32, 659-665.

Lefebvre-Ropars, G., Morency, C. (2018). Walkability: Which Measure to Choose, Where to Measure It, and How?, *Transportation research record* 2672 (35), 139-150.

Bourbonnais, P.L., Morency, C. (2018). Factors Affecting Interview Duration in Web-Based Travel Surveys, *Transportation Research Record* 2672 (42).

Marois, G., Lord, S., Morency, C. (2018). A mixed logit model analysis of residential choices of the young-elderly in the Montreal metropolitan area, *Journal of Housing Economics* In Press, Corrected Proof, Available online 22 August 2018.

Tétreault, L.-F., Eluru N., Hatzopoulou, M., Morency, P., Plante, C., Morency, C. and 10 other authors (2018). Estimating the health benefits of planned public transit investments in Montreal, *Environmental Research*, Volume 160, January 2018, Pages 412-419.

Frappier, A, Morency, C., Trépanier, M. (2018). Measuring the Quality and Diversity of Transit Alternatives. *Journal of Transport Policy*. 61: 51-59.

Verreault, H., Morency, C. (2018). Integration of a phone-based household travel survey and a web-based student travel survey, *Transportation*, January 2018, Volume 45, Issue 1, pp 89–103.

Alizadeh, H., Farooq, B., Morency, C., Saunier, N. (2018). On the role of bridges as anchor points in route choice modeling, September 2018, Volume 45, Issue 5, pp 1181–1206.

Alizadeh, H, Beaulieu, LD, Bouchard, É, Fabre, L, Jeudy, Y, Laviolette, J, Lefebvre-Ropars, G., Strauss, J., Wielinski, G., Morency, C. (2018). Smart Cities and Integrated Mobility: A White Paper³, Polytechnique Montréal.

N Saunier, F Bélisle, C Morency, P Nouri (2018) Evaluating the impacts of connected vehicles on GHG emissions: how to transfer the results from the literature, www.cirreлт.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2018-11.pdf

3

<https://static1.squarespace.com/static/596fb16003596e0fa70a232f/t/5b2a66c1f950b7e54549e35a/1529505474136/Smart-City-and-Integrated-Mobility-White-Paper-June-2018.pdf>

3.2 Participation à des congrès

3.2.1 Congrès annuel du Transportation research board 2018

Strauss, J. Morency, P., Morency, C. (2018). The Safety Benefits of a Lane Reduction and Modal Shift Toward City Buses: a Corridor-Level Analysis in Montreal (Canada), présenté au 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Moulin, A, Morency, C., Lord, S. (2018). Main Factors Related to Immobility Among Elderly People, présenté au 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Alizadeh, H., Morency, C, Saunier, N., Farooq, B. (2018). Factors Affecting Drivers' Consideration Set of Route Alternatives, présenté au 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Alizadeh, H., Farooq, B., Morency, C., Saunier, N. (2018). Frequent Vs Occasional Drivers: A Hybrid Route Choice Model, présenté au 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

Wielinski, G., Trépanier, M., Morency, C. (2018). Carsharing Service Adoption in a Dual-Mode Setting: A Station-Based and Free-Floating Case Study, présenté au 97th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.

3.2.2 Congrès annuel de l'Association québécoise des transports 2018

Bourbonnais, P.-L., Morency, C. (2018). REM, SRB, ligne bleue, ligne rose? Qui gagne et où?, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Verreault, H., Morency, C. (2018). Mobilité quotidienne : pas du pareil au même au fil de la semaine!, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Morency, C., Verreault, H., Bourbonnais, P.L., Bourdeau, J.S. (2018). La correspondance : cette mal-aimée et incomprise des trajets en transport en commun, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Laviolette, J., Morency, C., Hénault-Éthier, L. (2018). Quand la science rencontre le marketing : comment changer les normes sociales en matière de mobilité? présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Bruneau, J.F., Morency, C. (2018). Zone à priorité piétonne : les automobilistes vont-ils respecter cette nouvelle règle? présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Chibok, M., Morency, C., Trépanier, M. (2018). Où vont les utilisateurs BIXI? Étude et modélisation des lignes de désir de vélopartage, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Strauss, J., Morency, P., Morency, C. (2018). Décès et blessures sur les routes montréalaises : variation du risque selon le mode de transport et le secteur de résidence, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Bouchard, E., Morency, C. (2018). Les hauts et les bas de la consommation de kilowattheure des véhicules électriques en ville, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

Lefebvre-Ropars, G., Trépanier, M., Charbonneau, M., Morency, C. (2018). Fluidifier le déplacement des camions, une utopie?, présenté au 53^e Congrès de l'Association québécoise des transports, Québec.

3.2.3 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité 2018

Fabre, L., Morency, C. (2018). Structure des ménages et mobilité des personnes : influences et interaction, présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

Morency, C., Trépanier, M., Wielinski, G., Gayraud, F., Bourdeau, J.S. (2018), Véhicules en libre-service et transport en commun: des services complémentaires ou en compétition? présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

Chibok, M., Morency, C., Trépanier, M. (2018). Modélisation de la distribution des déplacements en vélopartage à Montréal, présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

Lefebvre-Ropars, G., Morency, C. (2018). Proposition d'une méthode d'évaluation de l'équité dans l'allocation de l'espace-temps urbain, présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

Pelé, N., Nicolas, J.P., Morency, C. (2018). Mécanisme d'intervention des caractéristiques du lieu de résidence sur le budget mobilité des ménages: une approche par les modèles d'équations structurelles, présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

Deschaintres, E., Morency, C., Trépanier, M. (2018). Mesurer la variabilité individuelle d'utilisation du transport en commun à l'aide d'un an de données de cartes à puce, présenté aux 1^{ères} Rencontres Francophones Transport Mobilité, Lyon, France.

3.2.4 Autres conférences et présentations

[International conference on travel behavior research 2018](#)

Morency, C., Bourdeau, J.S., Verreault, H. (2018). Modelling the interactions between mobility options in the surrounding of bikesharing stations, Présenté à la 15th International conference on travel behavior research 2018, Santa Barbara, California, USA.

[Entretiens Jacques Cartier 2018](#)

Morency, C. (2018). Participation à la table ronde « Quels scénarios pour une répartition différente des modes de transport ? » dans le cadre du Colloque « Les transports publics face à la transition énergétique », Lundi 12 novembre 2018, Lyon, France.

[Colloque annuel de l'Association du transport urbain du Québec \(ATUQ\)](#)

Morency, C. (2018). Défis et opportunités pour les systèmes de transport collectif, présenté dans le cadre du colloque annuel de l'ATUQ « L'expérience client – une interaction en continu! », Sherbrooke.

[Sommet Transport et mobilité du journal Les Affaires](#)

Morency, C. (2018). Vers la mobilité 2.0 : état des lieux, tendances et perspectives, présenté lors du Sommet Transport et mobilité du journal Les Affaires, Montréal, Novembre 2018.

École d'été du Labex Dynamite

Morency, C. (2018). Transportation and mobility, Keynote presentation, Summer school on « Massive spatial data: challenges in acquisition, treatment and use for territories » Florence, Italie.

3.3 Mémoires et thèses soutenus

3.3.1 Thèses de doctorat

Pelé, N. (2018). Dépenses des ménages pour leur mobilité quotidienne - une approche par les formes urbaines (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3175/>

Alizadeh Aliabadi, H. (2018). Behavioural Considerations in Route Choice Modelling (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3079/>.

3.3.2 Mémoires de maîtrise

Viallard, A. (2018). Méthodologie pour l'étude de l'évolution des comportements des voyageurs de transport collectif urbain (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3721/>

Bouchard, É. (2018). Analyse de la consommation énergétique de véhicules électriques (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3297/>

Chibok, M. (2018). Modèles de génération et de distribution de déplacements en vélopartage (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3296/>

Deschaintres, E. (2018). Analyse de la variabilité individuelle d'utilisation du transport en commun à l'aide de données de cartes à puce (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3284/>

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). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3192/>

Pelletier-Grenier, P. (2018). Modélisation de l'impact de la performance des modes actifs et collectifs sur le choix modal (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal). Tiré de <https://publications.polymtl.ca/3047/>

4 Références

- Ainsworth, B. E., Haskell, W. L., Herrmann, S. D., Meckes, N., Bassett Jr, D. R., Tudor-Locke, C., . . . Leon, A. S. (2011). 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. *Medicine & science in sports & exercise*, 43(8), 1575-1581.
- Anowar, S., Yasmin, S., Eluru, N., & Miranda-Moreno, L. F. (2014). Analyzing car ownership in Quebec City: a comparison of traditional and latent class ordered and unordered models. *Transportation*, 41(5), 1013-1039. doi:10.1007/s11116-014-9522-9
- Arentze, T.A., H.J.P. Timmermans (2000). *Albatross: A Learning-Based Transportation Oriented Simulation System*, EIRASS, Eindhoven.
- Atmani, D. (2015). *Affectation dynamique dans les systèmes de transport multimodaux*. (Université Paris-Est).
- Bahbouh, K. (2017). *Corridors de demande: Modélisation et contributions à l'évaluation du niveau de durabilité*. (Transportation engineering), École Polytechnique de Montréal, PolyPublie. Retrieved from https://publications.polymtl.ca/2433/1/2016_KinanBahbouh.pdf
- Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2015). Carsharing Demand Estimation Zurich, Switzerland, Area Case Study. *Transportation Research Record*(2536), 10-18. doi:10.3141/2536-02
- Barra, A., Carvalho, L., Teypaz, N., Cung, V.-D., & Balassiano, R. (2007). Solving the transit network design problem with constraint programming. Paper presented at the 11th World Conference in Transport Research-WCTR 2007.
- Bayart, C., Bonnel, P., & Morency, C. (2009). Survey mode integration and data fusion: methods and challenges. Dans P. Bonnel, M. Lee-Gosselin, J. Zmud & J.-L. Madre (édit.), *Transport survey methods: Keeping up with a changing world* (p. 587-611): Emerald Group Publishing Limited.
- Bergeron, L.-P., Canada et Human Resources and Skills Development Canada. (2004). *Looking-ahead: a 10 year outlook for the Canadian labour market 2004-2013 : final report*. Gatineau, Québec : Human Resources and Skills Development Canada.
- Bernard, A., Seguin, A.M., Bussiere, Y., Polacchini, A., 2011. Household Structure and Mobility Patterns of Women in O-D Surveys: Methods and Results Based on the Case Studies of Montreal and Paris. American Psychological Association.
- Bhat, C. R., & Guo, J. Y. (2007). A comprehensive analysis of built environment characteristics on household residential choice and auto ownership levels. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(5), 506-526. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.12.005>
- Bhat, C.R. and S.K. Singh (2000). A comprehensive daily activity-travel generation model system for workers, *Transportation Research Part A*, 34, 1-22.
- Bifulco, G.N., Carteni, A., Papola., A 2010. An Activity-Based Approach for Complex Travel Behaviour Modelling. *European Transport Research Review* 2 (4): 209–21.
- Blumenberg, E. et Manville, M. (2004). Beyond the Spatial Mismatch: Welfare Recipients and Transportation Policy. *Journal of Planning Literature*, 19(2), 182-205. doi:10.1177/0885412204269103

- Bocarejo S., J. P. et Oviedo H., D. R. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, 24, 142-154. doi:10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004
- Bohte, Wendy, and Kees Maat. 2009. "Deriving and Validating Trip Purposes and Travel Modes for Multi-Day GPS-Based Travel Surveys: A Large-Scale Application in the Netherlands." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17 (3): 285–97.
- Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J. (1984). *Classification and Regression Trees*. Wadsworth.
- Brundtland, G. (1987). *Our common future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development*. United Nations, Oslo, 1, 59.
- Cambridge-Dictionary. (Ed.) (2016) *Cambridge dictionary*.
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. *Scientific World Journal*. doi:10.1155/2013/704504
- Caulfield, B. (2011). Identifying the characteristics of households with multiple car ownership. Paper presented at the Transportation Research Board 90th Annual Meeting.
- Ceder, A. (2007). *Transit Service and Operations Planning*. Kidlington, GBR, UNITED KINGDOM : CRC Press. Repéré à <http://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=4634079>
- Ceder, A. (Avi), Butcher, M. et Wang, L. (2015). Optimization of bus stop placement for routes on uneven topography. *Transportation Research Part B: Methodological*, 74, 40-61. doi:10.1016/j.trb.2015.01.006
- Chakroborty, P. J. C. A. C., & Engineering, I. (2003). Genetic algorithms for optimal urban transit network design. 18(3), 184-200.
- Chow, J. Y. J., & Djavadian, S. (2015). Activity-based market equilibrium for capacitated multimodal transport systems. *Transportation Research Part C*, 59, 2-18. doi:10.1016/j.trc.2015.04.028
- Chowdhury, S. et Ceder, A. (2013). Definition of planned and unplanned transfer of public transport service and user decisions to use routes with transfers. *Journal of public transportation*, 16(2), 1.
- Chowdhury, S., Ceder, A. (Avi). (2016). Users' willingness to ride an integrated public-transport service: A literature review. *Transport Policy*, 48, 183-195. doi:10.1016/j.tranpol.2016.03.007
- Circella, G., Fulton, L., Alemi, F., Berliner, R. M., Tiedeman, K., Mokhtarian, P. L., & Handy, S. (2016). What Affects Millennials' Mobility? PART I: Investigating the Environmental Concerns, Lifestyles, Mobility-Related Attitudes and Adoption of Technology of Young Adults in California. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/1412918>
- City of Stockholm. (2012). *Urban Mobility Strategy* (p. 72). Stockholm, Suède : City of Stockholm. Repéré à <https://international.stockholm.se/globalassets/ovriga-bilder-och-filer/urban-mobility-strategy.pdf>
- Clark, B., Lyons, G., & Chatterjee, K. (2016). Understanding the process that gives rise to household car ownership level changes. *Journal of Transport Geography*, 55, 110-120. doi:https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.07.009

- Clellow, R. R. S. M., Gouri. (2017). Disruptive Transportation - The adoption, utilisation and impacts of Ride Hailing in the United States. Retrieved from http://usa.streetsblog.org/wp-content/uploads/sites/5/2017/10/2017_UCD-ITS-RR-17-07.pdf
- Clifton, K. J., & Moura, F. J. T. R. R. J. o. t. T. R. B. (2017). Conceptual Framework for Understanding Latent Demand: Accounting for Unrealized Activities and Travel. (2668), 78-83.
- Colville-Andersen, M. (2018). Copenhagenize: the definitive guide to global bicycle urbanism. Washington, DC, United States : Island Press.
- Commission scolaire de Laval. (s.d.). Distance de marche entre la résidence et l'école. Commission scolaire de Laval. Repéré 16 juillet 2018, à <https://www2.cslaval.qc.ca/spip.php?article1762>
- Conseil du trésor du Québec. (2016). Directive sur la gestion des projets majeurs d'infrastructure publique. Repéré à <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2742570>
- Cornut, B. et Madre, J.-L. (2017). A longitudinal perspective on car ownership and use in relation with income inequalities in the Paris metropolitan area. *Transport Reviews*, 37(2), 227-244. doi:10.1080/01441647.2016.1245218
- Couture, L.-E., Saxe, S. et Miller, E. . (2017). Cost-Benefit Analysis of Transportation Investment: A Literature Review (p. 16). University of Toronto.
- Currie, G., Richardson, T., Smyth, P., Vella-Brodrick, D., Hine, J., Lucas, K., ... Stanley, J. (2009). Investigating links between transport disadvantage, social exclusion and well-being in Melbourne—Preliminary results. *Transport Policy*, 16(3), 97-105. doi:10.1016/j.tranpol.2009.02.002
- Decaestercker, C. S., Saerens, M. (2017, Septembre). Les arbres de décisions (decision trees). Récupéré sur Université Paris Descartes: <http://www.math-info.univ-paris5.fr/~lomn/Cours/DM/Material/ComplementsCours/decisiontree.pdf>
- Désilets, S. (2012). Tendances liées à la composition, la motorisation et la localisation spatiale des ménages (Masters thesis, École Polytechnique de Montréal). Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/1055/>
- Desrosiers, J. (2001). Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport (p. 82). Ministère des Transports du Québec.
- Di Ciommo, F. et Shiftan, Y. (2017). Transport equity analysis. *Transport Reviews*, 37(2), 139-151. doi:10.1080/01441647.2017.1278647
- Dieleman, F. M., Dijst, M., & Burghouwt, G. (2002). Urban Form and Travel Behaviour: Micro-level Household Attributes and Residential Context. *Urban Studies*, 39(3), 507-527. doi:10.1080/00420980220112801
- Données Québec. (s.d.). Laval - Données Québec. Données Québec. Repéré 16 juillet 2018, à <https://www.donneesquebec.ca/fr/organisation/ville-de-laval/>
- Ewing, R. et Cervero, R. (2010). Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis. *Journal of the American Planning Association*, 76(3), 265-294. doi:10.1080/01944361003766766
- Faouzi, N.-E. E., & Klein, L. A. (2016). Data Fusion for ITS: Techniques and Research Needs. *Transportation Research Procedia*, 15, 495-512. doi:10.1016/j.trpro.2016.06.042

- Farber, S., Neutens, T., Miller, H. J., & Li, X. (2013). The social interaction potential of metropolitan regions: A time-geographic measurement approach using joint accessibility. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(3), 483-504.
- Farber, S., O'Kelly, M., Miller, H. J., & Neutens, T. (2015). Measuring segregation using patterns of daily travel behavior: A social interaction based model of exposure. *Journal of Transport Geography*, 49, 26-38.
- Feigon, S., & Murphy, C. (2018). Broadening Understanding of the Interplay Among Public Transit, Shared Mobility, and Personal Automobiles (Rapport no TCRP Research Report 195). Transportation Research Board.
- Ferraris, F. S. G. (2018). La mobilité de demain sera multimodale ou ne sera pas. *Le Devoir*. Tiré de <https://www.ledevoir.com/societe/transports-urbanisme/540068/mobility-as-a-service-l-avenir-sera-multimodal-ou-pas-du-tout?fbclid=IwAR3RZzsKefsVngEgrdo5VAc55sk9acZaElfCxMN19lh4j4IPUX5dyEhFY6Q>
- Fishman, E. (2016). Bikeshare: A Review of Recent Literature. *Transport Reviews*, 36(1), 92-113. doi:10.1080/01441647.2015.1033036
- Fishman, E., Washington, S., & Haworth, N. (2014). Bike share's impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 13-20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.013>
- Fishman, E., Washington, S., & Haworth, N. (2014). Bike share's impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 31, 13-20. doi:10.1016/j.trd.2014.05.013
- Flamm, B. (2009). The impacts of environmental knowledge and attitudes on vehicle ownership and use. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(4), 272-279. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.02.003>
- Fortin, P. (2016, juin). Méthodologie de caractérisation d'un réseau de transport en commun (masters, École Polytechnique de Montréal). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/2202/>
- Gallop, C., Zhao, J. et Tse, C. (2012). A Seasonal Autoregressive Model of Vancouver Bicycle Traffic Using Weather Variables, 17.
- Gallotti, R., & Barthelemy, M. (2014). Anatomy and efficiency of urban multimodal mobility. *Scientific Reports*, 4(1), 6911. doi:10.1038/srep06911
- Geurs, K. T. et van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127-140. doi:10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005
- Gössling, S., Schröder, M., Späth, P. et Freytag, T. (2016). Urban Space Distribution and Sustainable Transport. *Transport Reviews*, 36, 659-679. doi:<http://doi.org/10.1080/01441647.2016.1147101>
- Gouvernement du Canada. (2018). Policy on Cost-Benefit Analysis. Repéré 17 mars 2019, à <https://www.canada.ca/en/treasury-board-secretariat/services/federal-regulatory-management/guidelines-tools/policy-cost-benefit-analysis.html>
- Gouvernement du Québec. (2018). Transporter le Québec vers la modernité - Politique de mobilité durable - 2030. Québec: Direction des communications du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Retrieved from

https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/DocumentsPMD/politique-mobilite-durable.pdf.

Gouvernement du Québec. (2018, 7 mars). Loi sur les infrastructures publiques, RLRQ c I-8.3. Institut canadien d'information juridique. Repéré 14 mars 2019, à <https://www.canlii.org/fr/qc/legis/lois/rlrq-c-i-8.3/derniere/rlrq-c-i-8.3.html?searchUrlHash=AAAAAQAlbG9pIHN1ciBsZXMGaW5mcmFzdHJ1Y3R1cmVzIHB1YmxpcXVlcwAAAAAB&resultIndex=1>

Grengs, J. (2010). Job accessibility and the modal mismatch in Detroit. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 42-54. doi:10.1016/j.jtrangeo.2009.01.012

Guo, Z. et Wilson, N. H. M. (2011). Assessing the cost of transfer inconvenience in public transport systems: A case study of the London Underground. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(2), 91-104. doi:10.1016/j.tra.2010.11.002

Guo, Z., Wilson, N. H. M. et Rahbee, A. (2007). Impact of Weather on Transit Ridership in Chicago, Illinois. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2034(1), 3-10. doi:10.3141/2034-01

Habib, K.M.N., and Miller., E. J., 2009. "Modelling Activity Generation: A Utility-Based Model for Activity-Agenda Formation." *Transportmetrica* 5 (1): 3–23.

Habib, Khandker M. N., and Eric J. Miller. 2008a. "Modelling Daily Activity Program Generation Considering Within-Day and Day-to-Day Dynamics in Activity-Travel Behaviour." *Transportation* 35 (4): 467–84. <https://doi.org/10.1007/s11116-008-9166-8>.

Haghshenas, H., & Vaziri, M. (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecological Indicators*, 15(1), 115-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.010>

Hampton, S. (2013). Measuring Oklahoma Main Streets. Institute for Quality Communities Blog. Repéré à <http://iqc.ou.edu/2013/08/19/mainstreets/>

Henk, R. H. (1989). Quantification of Latent Travel Demand on New Urban Facilities in the State of Texas. *ITE Journal*, 59, 24-28.

Holroyd, E. (1967). The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area. Paper presented at the Proceedings of the Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Operations Research Society of America.

Hui, N., Saxe, S., Roorda, M., Hess, P. et Miller, E. J. (2018). Measuring the completeness of complete streets. *Transport Reviews*, 38, 73-95. doi:<https://dx.doi.org/10.1080/01441647.2017.1299815>

Hyndman, R. J. et Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. Repéré à <https://Otexts.org/fpp2/>

Ibeas, Á., dell'Olio, L., Alonso, B. et Sainz, O. (2010). Optimizing bus stop spacing in urban areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 446-458. doi:10.1016/j.tre.2009.11.001

International Transport Forum. (2011). Improving the Practice of Cost Benefit Analysis in Transport (International Transport Forum Discussion Papers no 2011/01). doi:10.1787/5kghzqx2q546-en

- Ito, K., Reardon, T. G., Arcaya, M. C., Shamsuddin, S., Gute, D. M. et Srinivasan, S. (2017). Built Environment and Walking to School. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2666, 78-84. doi:10.3141/2666-09
- Ji, Y., Gao, L., Fan, Y., Zhang, C. et Zhang, R. (2017). Waiting time perceptions at bus and metro stations in Nanjing, China: the importance of station amenities, trip contexts, and passenger characteristics. *Transportation Letters*, 0(0), 1-7. doi:10.1080/19427867.2017.1398854
- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2008). Creating more people-friendly urban streets through « Link and Place » street planning and design. *IATSS Research*, 32, 14-25. doi:[https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60196-5](https://dx.doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60196-5)
- Jones, P., Marshall, S. et Boujenko, N. (2009). « Link » and « Place »: A New Approach to Street Planning and Design. *Road and Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 18.
- Jones, Peter, et Mike Clarke. « The Significance and Measurement of Variability in Travel Behaviour ». *Transportation* 15, n° 1-2 (1 mars 1988): 65-87.
- Kenyon, S., Lyons, G. et Rafferty, J. (2002). Transport and social exclusion: investigating the possibility of promoting inclusion through virtual mobility. *Journal of Transport Geography*, 10, 207-219.
- Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. J. J. o. t. e. (2009). Transit route network design problem. 135(8), 491-505.
- Kitamura, R., Toshiyuki Y., Yusak O. Susilo, Axhausen, KW, 2006. "How Routine Is a Routine? An Analysis of the Day-to-Day Variability in Prism Vertex Location." *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (3): 259–79.
- Klincevicus, M., Morency, C., & Trépanier, M. (2014). Assessing Impact of Carsharing on Household Car Ownership in Montreal, Quebec, Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2416, 48-55. doi:10.3141/2416-06
- Krizek, K. J. (2003). Residential Relocation and Changes in Urban Travel: Does Neighborhood-Scale Urban Form Matter? *Journal of the American Planning Association*, 69(3), 265-281. doi:10.1080/01944360308978019
- Langlois, M., Wasfi, R. A., Ross, N. A., & El-Geneidy, A. M. (2016). Can transit-oriented developments help achieve the recommended weekly level of physical activity? *Journal of Transport & Health*, 3(2), 181-190.
- Lee, Y.-J., & Vuchic, V. R. J. J. o. T. E. (2005). Transit network design with variable demand. 131(1), 1-10.
- Lefebvre-Ropars, G. et Morency, C. (2018). Walkability: Which Measure to Choose, Where to Measure It and How? Communication présentée au Transportation Research Board 97th Annual Meeting, Washington, DC, United States : Transportation Research Board. Repéré à <https://trid.trb.org/view/1495808>
- Lefebvre-Ropars, G., Morency, C. et Negron-Poblete, P. (2019). Allocation of street space between road users and the quality of routes to school. Dans *TRB 98th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, DC, United States : Transportation Research Board.

- Lewis, P. et Torres, J. (2010). Les parents et les déplacements entre la maison et l'école primaire : quelle place pour l'enfant dans la ville? *Enfances, Familles, Générations*, (12), 44-64. doi:10.7202/044392ar
- Lierop, D. van, Badami, M. G. et El-Geneidy, A. M. (2018). What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *Transport Reviews*, 38(1), 52-72. doi:10.1080/01441647.2017.1298683
- Limtanakool, Narisra, Martin Dijst, et Tim Schwanen, 2006. The influence of socioeconomic characteristics, land use and travel time considerations on mode choice for medium- and longer-distance trips. *Journal of Transport Geography* 14, n° 5 p. 327-41.
- Litman, T. (2002). *Evaluating Transportation Equity*, 63.
- Litman, T. (2005). *Well Measured: Developing indicators for comprehensive and sustainable transport planning*.
- Lubitow, A., Rainer, J. et Bassett, S. (2017). Exclusion and vulnerability on public transit: experiences of transit dependent riders in Portland, Oregon. *Mobilities*, 12(6), 924-937. doi:10.1080/17450101.2016.1253816
- Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now? *Transport Policy*, 20, 105-113. doi:10.1016/j.tranpol.2012.01.013
- Lucas, K., Philips, I., Mulley, C. et Ma, L. (2018). Is transport poverty socially or environmentally driven? Comparing the travel behaviours of two low-income populations living in central and peripheral locations in the same city. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 116, 622-634. doi:10.1016/j.tra.2018.07.007
- Martel Poliquin, É. (2012). *Mieux comprendre les déterminants du choix modal*, 139.
- Martel Poliquin, É. (2012). *Mieux comprendre les déterminants du choix modal (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal)*. Tiré de <https://publications.polymtl.ca/904/>
- Martens, K. (2016). Why accessibility is not merely an option, but an absolute necessity, 33.
- Martens, K. et Di Ciommo, F. (2017). Travel time savings, accessibility gains and equity effects in cost-benefit analysis. *Transport Reviews*, 37(2), 152-169. doi:10.1080/01441647.2016.1276642
- Martin, E. W., & Shaheen, S. A. (2014). Evaluating public transit modal shift dynamics in response to bikesharing: a tale of two U.S. cities. *Journal of Transport Geography*, 41, 315-324. doi:10.1016/j.jtrangeo.2014.06.026
- Martin, E., Shaheen, S., & Lidicker, J. (2010). Impact of Carsharing on Household Vehicle Holdings. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2143, 150-158. doi:10.3141/2143-19
- Mattioli, G. (2014). Where Sustainable Transport and Social Exclusion Meet: Households Without Cars and Car Dependence in Great Britain. *Journal of Environmental Policy & Planning*, 16(3), 379-400. doi:10.1080/1523908X.2013.858592
- Mattson, J. (2008). Effects of Rising Gas Prices on Bus Ridership for Small Urban and Rural Transit Systems, 52.
- Methipara, J. C. (FHWA). (2014). *Mobility Challenges for Households in Poverty*, 4.

- Metrolinx. (2019). Analyses de rentabilité. Repéré 17 mars 2019, à http://www.metrolinx.com/fr/regionalplanning/projectevaluation/benefitscases/benefits_case_analyses.aspx
- Meurs, H. et Haaijer, R. (2001). SPATIAL STRUCTURE AND MOBILITY. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6D(6). Repéré à <https://trid.trb.org/view/693660>
- Ministère des Transports de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. (2018). *Transporter le Québec vers la modernité - Politique de mobilité durable 2030*.
- Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports. (2018). *Transporter le Québec vers la modernité: politique de mobilité durable - 2030*.
- Miranda-Moreno, L. F. et Nosal, T. (2011). Weather or Not to Cycle: Temporal Trends and Impact of Weather on Cycling in an Urban Environment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2247(1), 42-52. doi:10.3141/2247-06
- Mitra, R., Buliung, R. et Roorda, M. (2010). Built Environment and School Travel Mode Choice in Toronto, Canada. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2156, 150-159. doi:10.3141/2156-17
- Mjahed, L. B., Frei, C. et Mahmassani, H. S. (2015). Walking Behavior. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2495, 94-100. doi:10.3141/2495-10
- Moles, R., Foley, W., Morrissey, J., & O'Regan, B. (2008). Practical appraisal of sustainable development—Methodologies for sustainability measurement at settlement level. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(2-3), 144-165.
- Morency, C., Trépanier, M., & Demers, M. (2011). Walking to transit: an unexpected source of physical activity. *Transport Policy*, 18(6), 800-806.
- 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.
- MTO. (2017). Document d'information sur le budget des dépenses 2017-2018. Repéré 17 mars 2019, à <http://www.mto.gov.on.ca/french/publications/estimates-briefing-book-2017-18.shtml#priorities-and-results>
- Newell, G. J. T. S. (1979). Some issues relating to the optimal design of bus routes. 13(1), 20-35.
- Nicolas, J.-P., Pochet, P., & Poinboeuf, H. (2003). Towards sustainable mobility indicators: application to the Lyons conurbation. *Transport Policy*, 10(3), 197-208.
- NZ Transport Agency. (2013). Improving the cost-benefit analysis of integrated PT, walking and cycling (no Research Report 537). Repéré à <https://www.nzta.govt.nz/resources/research/reports/537>
- OECD. (2017). Improving transport cost-benefit analysis: Overview and findings. Repéré 17 mars 2019, à https://www.oecd-ilibrary.org/transport/quantifying-the-socio-economic-benefits-of-transport/improving-transport-cost-benefit-analysis-overview-and-findings_9789282108093-2-en
- OMS, O. m. d. I. S. (2009). *Recommandations mondiales sur l'activité physique pour la santé*. Genève Retrieved from http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44436/1/9789242599978_fre.pdf.

- Patterson, Zachary, and Kyle Fitzsimmons. 2016. DataMobile. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2594 (January): 35–43.
- Pattnaik, S., Mohan, S., & Tom, V. J. J. o. t. e. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. 124(4), 368-375.
- Patton, J. W. (2007). A Pedestrian World: Competing Rationalities and the Calculation of Transportation Change. Environment and Planning A, 39, 928-944. doi:<https://doi.org/10.1068/a389>
- Pendyala, R.M. and E.I. Pas (2000) Multiday and Multiperiod Data for Travel Demand Analysis and Modeling. In: Transport Surveys: Raising the Standard, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Pendyala, R.M., R. Kitamura, A. Kikuchi, T. Yamamoto and S. Fujii (2005). Famos, The Florida activity mobility simulator, in: Proceedings 84th TRB Annual Meeting, Washington, D.C
- Petrik, O., Martinez, L., & Furtado, F. (2018). Shared Mobility Simulations for Dublin. OECD/ITF.
- Preston, J. et Rajé, F. (2007). Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. Journal of Transport Geography, 15(3), 151-160. doi:10.1016/j.jtrangeo.2006.05.002
- Rakotamalala, R. (2005). Arbres de Décisions. Revue MODULAD, No. 33, pp. 163-187.
- Reardon, S. F., & Firebaugh, G. (2002). Measures of multigroup segregation. Sociological methodology, 32(1), 33-67.
- Ricci, M. (2015). Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of implementation and operation. Research in Transportation Business & Management, 15, 28-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.03.003>
- Richardson, A. J., E. S. Ampt, et A. H. Meyburg. SURVEY METHODS FOR TRANSPORT PLANNING, 1995. <https://trid.trb.org/view/450423>.
- Ritter, N., & Vance, C. (2013). Do fewer people mean fewer cars? Population decline and car ownership in Germany. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 50, 74-85. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.035>
- Rodriguez-Valencia, A. (2014). The Urban Right-of-way Allocation Problem: Considering All Demands. Dans TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers (p. 18). Washington, DC, United States : Transportation Research Board. Repéré à <https://trid.trb.org/view/1288973>
- Roorda, M.J., Miller, E.J., Habib, K.M.N. (2008). Validation of TASHA: a 24-hour Activity Scheduling Microsimulation Model. Transportation Research Part A: Policy and Practice 42 (2), pp. 360–375.
- Sabir, M. (2011). Weather and Travel Behaviour, 152.
- Sambe, A. M., Doyon, P. et Beaulieu, J. (2016). Guide de l'analyse avantages-coûts des projets publics en transport- Méthodologie (p. 58). Ministère des Transports du Québec. Repéré à <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/guides-formulaires/Documents/gestion-projets-routiers/guideaac-methodologie.pdf>

- Sartori, D. et Europäische Kommission (dir.). (2015). Guide to cost-benefit analysis of investment projects: economic appraisal tool for cohesion policy 2014 - 2020 (2014e éd.). Luxembourg : Publ. Office of the Europ. Union.
- Schlich, R., et K. W. Axhausen. Habitual travel behaviour:evidence from a six-week survey travel diary. *Transportation (Netherlands)* 30, n° 1 (février 2003). <https://trid.trb.org/view/734643>.
- Schuppan, J., Kettner, S., Delatte, A., & Schwedes, O. (2014). Urban Multimodal Travel Behaviour: Towards Mobility without a Private Car. *Transportation Research Procedia*, 4, 553-556. doi:10.1016/j.trpro.2014.11.042
- Schwanen, T., Kwan, M.-P. et Ren, F. (2008). How fixed is fixed? Gendered rigidity of space–time constraints and geographies of everyday activities. *Geoforum*, 39(6), 2109-2121. doi:10.1016/j.geoforum.2008.09.002
- Scott, D. M., & Axhausen, K. W. (2006). Household Mobility Tool Ownership: Modeling Interactions between Cars and Season Tickets. *Transportation*, 33(4), 311-328. doi:10.1007/s11116-005-0328-7
- Senbil, Metin, and Ryuichi Kitamura. 2009. "THE OPTIMAL DURATION FOR A TRAVEL SURVEY: Empirical Observations." *IATSS Research* 33 (2): 54–61. [https://doi.org/10.1016/S0386-1112\(14\)60244-2](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60244-2).
- Singhal, A., Kamga, C. et Yazici, A. (2014). Impacts of weather on public transport ridership: Results from mining data from different sources. doi:10.1016/j.trc.2016.12.001
- Sioui, L. (2014). Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable : concept, méthodes et outils. Polytechnique Montréal, Montréal.
- Sioui, L., Morency, C., & Trépanier, M. (2013). How Carsharing Affects the Travel Behavior of Households: A Case Study of Montréal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1), 52-69. doi:10.1080/15568318.2012.660109
- Sioui, L., Morency, C., & Trépanier, M. (2013). How Carsharing Affects the Travel Behavior of Households: A Case Study of Montréal, Canada. *International Journal of Sustainable Transportation*, 7(1), 52-69. doi:10.1080/15568318.2012.660109
- Spickermann, A., Grienitz, V., & von der Gracht, H. A. (2014). Heading towards a multimodal city of the future? Multi-stakeholder scenarios for urban mobility. *Technological Forecasting And Social Change*, 89, 201-221. doi:10.1016/j.techfore.2013.08.036
- Srinivasan, Sivaramakrishnan, and Chandra R. Bhat. 2005. "Modeling Household Interactions in Daily In-Home and out-of-Home Maintenance Activity Participation." *Transportation* 32 (5): 523–44.
- Statistique Canada. (2018). Tableau : 23-10-0067-01 - Immatriculations de véhicules automobiles, par type de véhicule. Retrieved from <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=2310006701>
- Statistique_Canada. (2016). Évolution de la population, agglomération de Montréal et composantes territoriales, 2011-2016.

Stopher, P. and Greaves, S. (2010). Missing and inaccurate information from travel surveys: pilot results, in Proceedings of the 32nd Australian Transport Research Forum. Auckland, New Zealand.

Stopher, P. R., S. P. Greaves, and E. Clifford. Multi-Day Household Travel Surveys: Sampling Issues. Presented at 30th Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Australia, September 2007.

Tanguay, G. A., Rajaonson, J., Lefebvre, J.-F., & Lanoie, P. (2010). Measuring the sustainability of cities: An analysis of the use of local indicators. *Ecological Indicators*, 10(2), 407-418.

Transport and Infrastructure Council of Australia. (2018). Australian Transport Assessment and Planning Guidelines: T2 Cost Benefit Analysis (p. 77). Repéré à https://atap.gov.au/tools-techniques/cost-benefit-analysis/files/t2_cost_benefit_analysis.pdf

Tremblay, P. (2002). Survol technique du modèle de transport de la région de Montréal. Service de la modélisation des systèmes de transport. Direction du partenariat, de la modélisation et de la géomatique. Ministère des Transports du Québec.

Tresury Board of Canada. (2007). Canadian Cost-Benefit Analysis Guide: Regulatory Proposals (p. 51). Repéré à <https://www.tbs-sct.gc.ca/rtrap-parfa/analys/analys-eng.pdf>

UK Social Exclusion Unit. (2003). Making the connections: final report on transport and social exclusion: summary. ResearchGate. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/37183823_Making_the_connections_final_report_on_transport_and_social_exclusion_summary

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

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

Van Oudheusden, D., Ranjithan, S., & Singh, K. J. T. (1987). The design of bus route systems—An interactive location-allocation approach. 14(3), 253-270.

van Wee, B. (2011). Discussing Equity and Social Exclusion in Accessibility Evaluations, 18.

Vélo Québec. (2015). À pied, à vélo, ville active - 10 ans de partenariats structurants.

Venables, A. (2016). Incorporating Wider Economic Impact within Cost-Benefit Appraisal (no 2016.05) (p. 30). International Transport Forum. Repéré à <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/incorporating-wider-economic-impacts-cba.pdf>

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

Verreault, H., Morency, C., 2011. "Transcending the Typical Weekday with Large-Scale Single-Day Survey Samples", *Transportation Research Record* 2230 (1): 38–47. <https://doi.org/10.3141/2230-05>.

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

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

Vuchic, V. R. (2005). Urban transit: operations, planning and economics. Hoboken, N.J : J. Wiley & Sons.

Wardman, M. (2001). A review of British evidence on time and service quality valuations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2), 107-128. doi:10.1016/S1366-5545(00)00012-0

Wardman, M. (2004). Public transport values of time. *Transport Policy*, 11(4), 363-377. doi:10.1016/j.tranpol.2004.05.001

Wardman, M., Chintakayala, V. P. K. et de Jong, G. (2016). Values of travel time in Europe: Review and meta-analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 94, 93-111. doi:10.1016/j.tra.2016.08.019

Wong, B. Y.-M., Faulkner, G. et Buliung, R. (2011). GIS measured environmental correlates of active school transport: A systematic review of 14 studies. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 8, 39. doi:10.1186/1479-5868-8-39

Wong, D. W., & Shaw, S.-L. (2011). Measuring segregation: An activity space approach. *Journal of geographical systems*, 13(2), 127-145.