

Titre: Caractérisation de la complémentarité entre le vélo et le transport
Title: en commun

Auteur: Killian Giraudi
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Giraudi, K. (2024). Caractérisation de la complémentarité entre le vélo et le
Citation: transport en commun [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/60327/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/60327/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Catherine Morency
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

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

KILLIAN GIRAUDI

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Novembre 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

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

présenté par **Killian GIRAUDI**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Francesco CIARI, président

Catherine MORENCY, membre et directrice de recherche

Bartek KOMOROWSKI, membre

DÉDICACE

‘Pour ce qui est de l’avenir, il ne s’agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible.’

Antoine de Saint-Exupéry

REMERCIEMENTS

C'est avec une profonde gratitude que je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de recherche, Catherine Morency, sans qui ce projet n'aurait jamais vu le jour. Son enthousiasme, son énergie débordante et sa passion communicative ont été des moteurs essentiels à la réussite de ce travail. Grâce à elle, j'ai eu l'opportunité de participer à des événements enrichissants et de découvrir de nombreuses opportunités au sein du groupe de recherche.

Honoré de pouvoir collaborer avec les partenaires de la Chaire Mobilité – la Ville de Montréal, la Société de transport de Montréal (STM), l'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM) et le Réseau de transport métropolitain (Exo) – je souhaite les remercier pour les discussions passionnantes et leur intérêt constant pour nos recherches.

Avec toute ma reconnaissance, je remercie les associés de recherche de la Chaire Mobilité, Pierre-Léo Bourbonnais, Jean-Simon Bourdeau, Hubert Verreault et Geneviève Bastien, pour leur disponibilité et leur aide précieuse tout au long de mon projet.

Très reconnaissant également envers les étudiants formidables que j'ai rencontrés durant cette maîtrise, qui ont enrichi cette expérience par leur présence et leurs échanges.

Grâce à ma mère et à mon père, qui m'ont toujours soutenu avec une bienveillance sans faille, j'ai pu traverser ce projet et bien d'autres défis. Je tiens à remercier ma famille, en particulier ma mère, pour son appui indéfectible dans cette recherche et bien au-delà.

Pour finir, je n'oublie pas mes colocataires et amis, qui, à leur manière, ont été d'une aide inestimable dans cette aventure.

Tous ont contribué à rendre cette expérience inoubliable et enrichissante, et je leur en suis profondément reconnaissant.

RÉSUMÉ

Dans une société où l'automobile occupe une place prédominante, l'adoption de comportements de mobilité durable est urgente. La réduction de l'utilisation de l'automobile entraîne nécessairement une augmentation de l'usage des modes de transport durables comme les transports en commun, le vélo et d'autres alternatives. Toutefois, pour que cette transition soit efficace, une meilleure compréhension des interactions entre ces modes de transport est nécessaire. Parmi ces interactions, la complémentarité entre les transports en commun et le vélo apparaît comme une solution prometteuse pour réduire la dépendance à l'automobile.

Actuellement, il manque des outils et méthodes efficaces pour mesurer l'accessibilité cyclable autour des stations de transport en commun, tout en prenant en compte le confort des cyclistes. L'objectif principal de cette étude est d'apporter une réflexion sur ces interactions et de proposer une méthodologie simple et reproductible pour évaluer l'accessibilité cyclable autour des stations de métro à Montréal, en intégrant les critères de confort cyclable. Cette méthodologie vise à identifier les zones où des interventions sur le réseau cyclable pourraient améliorer l'intégration entre vélo et transports en commun.

L'étude repose sur l'évaluation de l'accessibilité cyclable actuelle des stations de métro de Montréal, en utilisant divers indicateurs. Des isochrones ont été générées pour mesurer l'accessibilité dans un rayon de 5, 10 et 15 minutes de vélo autour des stations. En parallèle, plusieurs scénarios d'amélioration du réseau cyclable ont été développés pour comprendre l'impact potentiel de ces améliorations.

Les résultats montrent qu'environ 40 % de la population montréalaise peut accéder à une station de métro en 10 minutes de vélo, et ce chiffre atteint 51 % pour un trajet de 15 minutes. Toutefois, certaines stations, notamment à l'ouest de la ligne orange, manquent d'infrastructures cyclables, révélant des zones prioritaires pour des interventions futures.

Cette étude met en avant l'importance de développer des infrastructures cyclables autour des stations de métro pour accroître l'accessibilité et encourager une mobilité urbaine durable. Les scénarios proposés montrent que des améliorations du réseau cyclable peuvent transformer significativement l'accessibilité des transports en commun, en particulier dans les zones actuellement sous-desservies.

ABSTRACT

In a society where the automobile holds a predominant position, the need to adopt more sustainable mobility behaviors is urgent. Reducing car use necessarily leads to an increase in the use of sustainable modes of transport such as public transit, cycling, and other alternatives. However, for this transition to be effective, a better understanding of the interactions between these modes of transport is needed. Among these interactions, the complementarity between public transit and cycling appears to be a promising solution to reduce reliance on cars.

Nevertheless, there is currently a lack of tools and methods to effectively measure cycling accessibility around public transit stations, while considering cyclist comfort. The main objective of this study is to reflect on these interactions and propose a simple and reproducible methodology to evaluate cycling accessibility around Montreal metro stations, integrating comfort criteria. This methodology aims to identify areas where cycling interventions can enhance integration with public transit.

The study is based on evaluating the current cycling accessibility of Montreal metro stations using various indicators. Isochrones were generated to measure accessibility within 5, 10, and 15-minute cycling trips around metro stations. In parallel, several improvement scenarios were developed to understand the potential impact of network enhancements.

The results show that around 40% of Montreal's population can access a metro station within 10 minutes by bike, and this figure rises to 51% for a 15-minute journey. However, certain stations, particularly in the west of the orange line, lack cycling infrastructure, highlighting priority areas for future interventions.

This study emphasizes the importance of developing cycling infrastructure around metro stations to increase accessibility and encourage sustainable urban mobility. The proposed scenarios demonstrate that improvements to the cycling network can significantly transform public transit accessibility, especially in currently underserved areas.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.1.1 Contexte général sur l’historique des transports	1
1.1.2 Le contexte Montréalais	8
1.2 Énoncé du problème.....	14
1.3 Objectifs de la recherche	15
1.4 Structure du mémoire	16
CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES	18
2.1 Le développement durable	18
2.1.1 En quoi la prédominance de l’automobile en milieu urbain pose des problèmes de développement durable ?.....	19
2.1.2 L’approche ‘Réduire-Transférer-Améliorer’	23
2.1.3 Les déterminants du choix modal.....	24
2.2 Les interactions vélo - transport en commun	26

2.2.1	Définition	26
2.2.2	Bassin d'attraction des stations de transport en commun	27
2.2.3	Amélioration de la portée des transports en commun	27
2.2.4	Potentiel latent.....	28
2.2.5	Demande induite	29
2.3	Intermodalité : Intégration du vélo avec les transports en commun	30
2.3.1	Combinaison vélo et transport en commun.....	30
2.3.2	Systèmes de vélopartage	31
2.3.3	Vélo à bord	32
2.3.4	Les facteurs qui bonifient cette intégration	33
2.4	Cohabitation entre les modes	35
2.4.1	Partage de l'espace	35
2.4.2	Conflits	37
2.4.3	Conflits bus / vélos.....	38
2.5	Complémentarité d'usage.....	42
2.5.1	Variabilité temporelle d'usage	42
2.5.2	Complémentarité vs compétitivité	46
2.5.3	Multimodalité	47
2.6	Synthèse	48
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE	49
3.1	Mise en contexte	49
3.2	Territoire d'étude.....	50
3.3	Sources de données	50
3.4	Choix de l'outil de calcul des bassins d'accessibilité	52

3.4.1	Outil Open Source	52
3.4.2	Outil prenant en compte le confort cyclable	53
3.4.3	Outil simple d'utilisation.....	56
3.4.4	L'outil retenu.....	57
3.5	Création des bassins d'attraction cyclable	58
3.5.1	Étape 1 : Définition du réseau	58
3.5.2	Étape 2 : Calcul des isochrones.....	59
3.5.3	Étape 3 : Calcul des surfaces accessibles	61
3.6	Choix des indicateurs	65
3.6.1	Superficie	66
3.6.2	Périmètre	67
3.6.3	Longueur du réseau routier et densité	67
3.6.4	Longueur du réseau cyclable et densité.....	68
3.6.5	Ratio longueur réseau cyclable / longueur réseau routier	68
3.6.6	Pourcentage de couverture de la surface maximale théorique	69
3.6.7	Pourcentage de couverture de la population maximale théorique.....	70
3.6.8	Potentiel absolu de population latente.....	71
3.7	Scénarios d'amélioration.....	73
3.7.1	Extension du réseau cyclable	73
3.7.2	Augmentation de la vitesse cyclable	74
CHAPITRE 4	RÉSULTATS ET ANALYSE.....	76
4.1	Bassins d'attraction cyclable autour des stations de transport en commun	76
4.1.1	Bassin d'attraction cyclable à l'échelle de tout le réseau de métro.....	78
4.1.2	Comparaison de l'accès au métro à vélo et à pied	79

4.2	Analyse des différents indicateurs.....	80
4.2.1	Surface.....	87
4.2.2	Périmètre	87
4.2.3	Longueur du réseau routier et densité	88
4.2.4	Longueur du réseau cyclable et densité.....	89
4.2.5	Ratio longueur réseau cyclable / longueur réseau routier	90
4.2.6	Pourcentage de couverture de la surface théorique (PCST).....	90
4.2.7	Pourcentage de couverture de population théorique (PCPT)	92
4.2.8	Potentiel absolu de population latente.....	93
4.2.9	Synthèse des résultats.....	95
4.2.10	Classement des stations en fonction de l'accessibilité cyclable.....	96
4.3	Corrélation.....	101
4.4	Scénarios d'amélioration.....	102
CHAPITRE 5	CONCLUSION	106
5.1	Résumé des principales contributions	106
5.2	Résumé des principaux résultats	107
5.2.1	Accessibilité cyclable des stations de métro à l'échelle de l'île de Montréal	107
5.2.2	Comparaison avec l'accès aux transports en commun à pied	107
5.2.3	Résultats des différents indicateurs par station	107
5.2.4	Analyse de corrélation.....	108
5.2.5	Scénarios d'amélioration du réseau cyclable	108
5.3	Limitation de l'étude	109
5.3.1	Hypothèse de marchabilité des segments non cyclables	109
5.3.2	Sécurité aux intersections non considérée.....	109

5.3.3	Non prise en compte des pentes	109
5.3.4	Choix du réseau cyclable et de la vitesse de parcours.....	110
5.3.5	Données de population et analyse des résultats	111
5.3.6	Non prise en compte des distances de marche dans les stations	111
5.4	Suggestions pour de futures recherches	111
5.5	Conclusion générale	112
RÉFÉRENCES.....		114
ANNEXES		125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Comparaison des parts modales de différentes métropoles.....	14
Tableau 3.1 Résumé des critères de choix de l’outil de calcul des isochrones	58
Tableau 4.1 Part de la population ayant accès au métro à vélo pour différents intervalles	79
Tableau 4.2 Comparaison des parts de la population ayant accès au métro à vélo et à pied pour différents intervalles	80
Tableau 4.3 Résultats des différents indicateurs de caractérisation de la géométrie pour chaque station et pas de temps.....	81
Tableau 4.4 Résultats des différents indicateurs de caractérisation des réseaux pour chaque station et pas de temps	83
Tableau 4.5 Résultats des différents indicateurs de mesure de la performance pour chaque station et pas de temps	85
Tableau B.1 Surfaces des zones accessibles pour différentes valeurs du paramètre use_roads et différents pas de temps	128
Tableau B.2 Comparaison des différentes méthodes	131
Tableau C.1 Comparaison entre les méthodes	138

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Répartition du réseau cyclable par type de voie (Vélo Québec).....	9
Figure 2.1 Facteurs influençant le choix modal, Courel & Deguire (2020)	25
Figure 2.2 Différentes configurations d'arrêt d'autobus : voie partagée bus/vélo (en haut) piste cyclable séparée et îlot d'embarquement (en bas)	41
Figure 2.3 Schéma d'un arrêt d'autobus en bordure d'une voie cyclable (Ville de Montréal).....	42
Figure 3.1 Définition du réseau.....	59
Figure 3.2 Calcul des isochrones.....	61
Figure 3.3 Calcul des surfaces accessibles.....	62
Figure 3.4 Union spatiale des isochrones des différents édifices	63
Figure 3.5 Comparaison des isochrones avec et sans les trous	64
Figure 3.6 Isochrones obtenues pour la station De Castelnau à différents pas de temps.....	65
Figure 3.7 Liste des différents indicateurs choisis	66
Figure 3.8 Principe de calcul du pourcentage de couverture de la surface maximale théorique ..	69
Figure 3.9 Principe de calcul du pourcentage de couverture de la population maximale théorique	71
Figure 3.10 Principe de calcul du potentiel de population latente	72
Figure 3.11 Principe de répartition des vitesses pour le scénario d'extension du réseau cyclable	74
Figure 3.12 Principe de répartition des vitesses pour le scénario d'amélioration de la vitesse cyclable.....	75
Figure 4.1 Isochrones obtenues pour toutes les stations à différents pas de temps.....	77
Figure 4.2 Représentation spatiale des PCST au pas de temps 10 minutes pour chaque station ..	91
Figure 4.3 Représentation spatiale des PCPT au pas de temps 10 minutes pour chaque station ..	93
Figure 4.4 Représentation spatiale du potentiel de population latent au pas de temps 10 minutes pour chaque station.....	94

Figure 4.5 Représentation du classement d'accessibilité cyclable des stations.....	97
Figure 4.6 Classification des stations en fonction du PCPT et du potentiel de population (4 groupes)	99
Figure 4.7 Représentation des groupes à l'échelle de la ville.....	100
Figure 4.8 Analyses de corrélation de l'accessibilité en fonction de la densité de rue (à gauche) et en fonction du ratio longueur cyclable / routier (à droite)	102
Figure 4.9 Résultats des différents scénarios	103
Figure 4.10 Diagramme boîte à moustache de l'indicateurs PCPT de chaque station aux différents scénarios pour le pas de temps 10 minutes	104
Figure A.1 Diagramme des interactions de la variable use_roads dans l'algorithme utilisé par valhalla	125
Figure B.1 Différence entre les isochrones en fonction de la valeur du paramètre use_roads ...	128
Figure B.2 Utilisation du territoire.....	129
Figure B.3 Densité de ménages.....	130
Figure B.4 Variation des surfaces	132
Figure B.5 Variation des surfaces pour chaque station.....	133
Figure B.6 Intensité de la variation de surface.....	134
Figure B.7 Analyse de corrélation.....	138
Figure D.1 Répartition des stationnements vélo	141
Figure D.2 Distances observées	143

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ARTM	Autorité régionale du transport métropolitain
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
GES	Gaz à effet de serre
GIS	Geographic information system
OD	Origine Destination
PCST	Pourcentage de couverture de la surface théorique
PCPT	Pourcentage de couverture de la population théorique
REM	Réseau Express Métropolitain
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
STL	Société de transport de Laval
STM	Société de transport de Montréal
TC	Transport en commun

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Diagramme des interactions de la variable use_roads dans l'algorithme utilisé par Valhalla	141
ANNEXE B Manipulations réalisées avec le calculateur valhalla	142
ANNEXE C Comparaison entre valhalla et l'algorithme d'analyse de réseau de QGIS.....	152
ANNEXE D Etude des stationnements vélos des stations de la ligne Bleue	157

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Aux États-Unis et au Canada, la place dédiée à l'automobile est importante. En 2021, 91,7 % des ménages américains disposaient d'au moins un véhicule, tandis que 22,1 % en possédaient trois ou plus (U.S. Census Bureau, 2024). À l'échelle mondiale, les différentes sources de données donnent des résultats assez hétérogènes, mais les tendances sont les suivantes. Aux États-Unis, on compte en moyenne entre 800 et 900 véhicules pour 1 000 habitants (Hedges & Company, 2024), ce qui représente le taux le plus élevé au monde, exception faite de certains paradis fiscaux. Au Canada, bien que légèrement inférieures, les statistiques montrent environ 600 à 700 véhicules pour 1 000 habitants (Statistics Canada, 2022), positionnant le pays juste au troisième niveau mondial, derrière la Nouvelle-Zélande. En comparaison, l'Europe enregistre entre 520 et 640 véhicules pour 1 000 habitants (International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, 2020), le Japon entre 590 et 610 (Statistics Japan, 2019), et la Chine, premier marché mondial pour les ventes de voitures neuves, seulement entre 160 et 214 véhicules pour 1 000 habitants (China Automotive News, 2022), mais avec un contexte socio-démographique différent.

Cependant, cette situation n'a pas toujours été la même, et pour comprendre son évolution, il faut examiner l'histoire des transports dans la région sous les angles de l'urbanisme, de la politique et des enjeux sociaux.

1.1.1 Contexte général sur l'historique des transports

Cette section explore l'histoire des transports en Amérique du Nord et la manière dont elle a façonné la situation actuelle. Il est important de préciser que, lorsque nous parlons de l'Amérique du Nord, nous faisons principalement référence aux États-Unis et au Canada, en raison de leurs similitudes culturelles et visuelles. Toutefois, cette approche ne doit pas occulter l'importance de grandes villes situées au Mexique et dans les Caraïbes, qui ont leur propre dynamique de transport.

Il est crucial d'adopter une perspective nuancée. L'Amérique du Nord regroupe plusieurs pays, États, provinces, villes et quartiers, chacun avec ses particularités en matière de géographie, de climat et d'histoire. Ce vaste continent est marqué par des points communs, mais aussi par des différences significatives dans la manière dont les transports y sont gérés et développés.

1.1.1.1 L'Histoire des transports en Amérique du Nord

D'après le Musée National de l'Histoire Américaine, au début du XX^e siècle, les rues d'Amérique du Nord étaient fréquentées par des piétons, des chariots agricoles et de marchandises, des bicyclettes et, dans certaines villes, des tramways et les premières automobiles. La majorité des déplacements se faisaient à pied ou en tramway, les bicyclettes étaient également fréquentes, et seuls les plus aisés possédaient des calèches tirées par des chevaux. Les surfaces routières se sont améliorées progressivement pour accueillir davantage de véhicules, tout en maintenant une vitesse modérée, permettant aux piétons de circuler et de traverser les rues.

Initialement, les automobiles, surtout utilisées pour des trajets courts ou récréatifs, étaient un luxe réservé aux plus fortunés. Les tramways, souvent tirés par des chevaux ou propulsés par un câble sous la voie, ont commencé à être électrifiés au début du siècle. Cette électrification a facilité l'émergence des premières banlieues, offrant aux citadins la possibilité de vivre plus loin de leur lieu de travail tout en bénéficiant des avantages de la vie rurale. En 1917, les États-Unis possédaient environ 70 000 km de voies de tramway, fréquentées par des millions de passagers. À Montréal, le tramway a atteint son apogée dans les années 1920, avec un réseau de plus de 500 km et plus de 900 véhicules transportant près de 230 millions de passagers annuellement (Société des Transports de Montréal).

Cependant, au fil des décennies, les tramways ont commencé à décliner, affectés par divers facteurs tels que les limitations techniques, les politiques gouvernementales et entrepreneuriales, les préférences des consommateurs, ainsi que le développement de nouvelles alternatives comme le bus et l'automobile (National Museum of American History, 2003).

1.1.1.2 Qu'est-il arrivé au Tramway ?

Les bus ont commencé à remplacer le tramway au début des années 1910. De nombreux passagers les considéraient comme étant plus modernes, confortables, voire comme des remplacements luxueux pour les anciens tramways inconfortables. Pour les opérateurs de transport, les bus offraient de nombreux avantages, puisqu'ils sont plus flexibles à l'opération et moins chers à l'achat que les tramways. Dans certaines villes les entreprises automobiles comme General Motors, Firestone Tire ou Standard Oil of California ont influencé les compagnies de transport à reconvertir leur flotte de tramway vers des bus, mais de nombreuses villes ont opéré le changement sans cette

influence, si bien qu'en 1937, 50% des villes américaines qui possédaient du transport en commun étaient desservies uniquement par des bus (National Museum of American History, 2003).

La principale raison du déclin du tramway est que les personnes ont choisi une autre option – l'automobile. Elle est devenue l'option de navettage de choix pour les personnes suffisamment aisées pour l'aborder. A Montréal, le dernier tramway était en service jusqu'en 1959.

1.1.1.3 Le développement des banlieues

Au cours du XIX^e siècle, le tramway a permis l'apparition de nouveaux quartier périphériques, les banlieues, dans lesquelles les habitants pouvaient profiter des avantages des espaces ruraux tout en se rendant en ville pour leur emploi ou pour les commerces. De nombreux quartiers ont ainsi émergés grâce à l'initiative de compagnies de transport privées qui, utilisant le besoin de mobilité et de logement, ont développé de nouvelles zones. Ces compagnies installaient d'abord un réseau de tramways dans des zones peu développées, ce qui augmentait la valeur foncière des terrains environnants. Elles revendaient ensuite ces terrains à profit, une fois que la hausse de la valeur due à l'installation du tramway avait été réalisée.

Après la Première Guerre Mondiale, le développement de l'automobile a rendu la vie dans les banlieues encore plus attrayantes. Au milieu des années 1920 puis surtout après la Seconde Guerre Mondiale, de nombreux supermarchés ont commencé à se relocaliser en dehors des quartiers centraux, contribuant ainsi au déclin du centre et développant encore plus les banlieues. Après une période de crise et de privation lors de la Seconde Guerre Mondiale, les années 1950 étaient symbole de prospérité. Plus de familles pouvaient s'acheter des voitures, et pouvaient acheter ou louer leur propre maison. La possession automobile a apporté des changements profonds aux villes américaines. Les commerces ont déménagé des quartiers centraux vers les zones périphériques, où le stationnement est plus aisé. Le magasinage et la conduite se sont ainsi unifiés dans des espaces dédiés à l'automobile, avec des espaces de stationnement immenses et gratuits. Durant cette période d'après-guerre, le développement des banlieues a atteint un rythme qui n'aurait jamais été imaginé avant, sur des distances qui n'aurait jamais été considérées acceptables auparavant. Un exemple célèbre est Park Forest, un des plus grands quartier construit de façon privée du pays, qui a ouvert en 1948 à presque 50 km des emplois et services du centre de Chicago.

1.1.1.4 L'automobile et les villes

Dans les années 1950, alors que les nouveaux quartiers périphériques prospèrent et se multiplient, les quartiers centraux connaissent une période de crise. L'augmentation de l'accès aux automobiles a facilité le déplacement des commerces et de la population dans les banlieues, laissant derrière les populations les plus pauvres et certaines minorités, ainsi qu'une crise fiscale (Taras, 2012). Les systèmes de transport en commun perdaient des utilisateurs et de l'argent, et les rues étaient de plus en plus embouteillées. Le nombre d'automobiles grandissant saturant complètement le réseau routier, différents grands projets d'infrastructure ont vu le jour pour répondre à cette demande. Par exemple à Chicago, la construction d'autoroutes urbaines a été proposée dès 1940, face à la crainte que les embouteillages menacent le quartier d'affaire. La construction d'un système d'autoroutes urbaines a ainsi commencé, avec un nombre d'entre elles passant à travers des quartiers pauvres. La construction d'un réseau d'autoroute interurbaine a également été votée par le Congrès en 1956, sous le président Eisenhower. Ce système de 65 000 km était prévu pour relier toutes les villes avec une population de plus de 100 000 habitants. Avec un budget de plus de \$100 Milliard - principalement provenant des taxes sur le carburant-, ce projet a profondément modifié les paysages du pays ainsi que la vie des habitants, et la façon dont le commerce est conduit. Les trains étaient autrefois la meilleure option pour se déplacer sur de longues distances. Mais après la Seconde Guerre Mondiale, alors que le territoire se couvrait d'autoroutes, ces trajets se faisaient de plus en plus en automobile. Le réseau autoroutier a entraîné le déclin de nombreuses petites villes, en détournant la circulation en direction des services, de l'essence, de la nourriture et de l'hébergement, désormais disponibles aux échangeurs autoroutiers. Certaines autres villes ont connu un essor alors que le relatif coût d'un trajet en automobile a baissé, favorisant le tourisme. Après la Seconde Guerre Mondiale, le développement résidentiel et commercial s'étend toujours plus loin des centres, dans des zones avec une faible densité de population, et éloignées des lignes importantes des réseaux de transport en commun. Les bus étaient principalement utilisés pour connecter certains quartiers avec les lignes de transport en commun plus lourdes. A la fin des années 1950 à Chicago par exemple, un quart de tous les travailleurs du quartier d'affaire arrivaient à leur destination en bus. Encore plus prenaient un bus pour se rendre à une ligne de transport en commun plus lourde, pour commencer leur navettage quotidien.

1.1.1.5 Qu'est-il arrivé ensuite au transport en commun ?

La fréquentation des transports en commun a atteint son niveau maximum au cours de la Seconde Guerre Mondiale, avant de diminuer progressivement alors que de plus en plus de personnes utilisaient leur automobile, et que les zones commerciales et résidentielles se développaient de plus en plus loin des lignes de transport en commun existantes. Entre la fin des années 1950, et le début des années 1970, plus de 170 compagnies américaines de transport en commun ont cessé d'opérer dans les différentes villes du pays (A. Caro, 1974). En 1964, le Président Lyndon Johnson lança un plan de relance des réseaux de transport en commun en réponse aux problèmes de congestion. Les investissements fédéraux dans le transport en commun augmentaient, même si la fréquentation ne suivait pas. Ces investissements ont engendré de nouveau système de transport en commun rapides comme ceux de San Francisco, Atlanta, ou Washington DC. Ces réseaux qui allaient chercher loin dans les banlieues étaient pensés pour attirer les utilisateurs assez aisés pour posséder une automobile. Cependant même avec ces efforts, les villes américaines ont continué de s'étaler et le transport en commun ne pouvait pas constituer une alternative efficace face à l'automobile. En effet, ces nouveaux systèmes à la pointe de la technologie ne permettaient toujours pas de rendre accessible la majeure partie des zones urbaines sans un réseau de bus efficace. Dans de nombreux cas, les lignes de bus qui auraient pu permettre de rabattre les passagers vers le réseau lourd de transport en commun étaient inadaptées, les opérateurs du réseau de bus n'étaient pas les mêmes que ceux des lignes rapides, causant une double facturation pour l'utilisateur et peu de coordination dans le service offert. En l'absence d'un réseau de bus de rabattement efficace et avec peu de personnes à une distance de marche raisonnable, la seule façon de rendre les stations accessibles était de créer de grands espaces de stationnement. La plupart des personnes sans voiture étaient donc encore délaissées par ces projets, et les personnes possédant une voiture préféraient régulièrement conduire jusqu'à leur destination plutôt que de se garer à la station et de monter dans le train. Les systèmes de transport créés à cette époque étaient relativement efficaces dans des villes avec un centre d'affaire fort et dense concentrant une majorité des emplois comme ceux de Washington DC ou San Francisco. Mais d'autres villes comme Miami ou Atlanta qui avaient à l'époque un quartier d'affaire moins fort n'ont pas connu l'achalandage escompté pour leur réseau de transport en commun.

1.1.1.6 Un changement d'état d'esprit dans les années 1970

Alors qu'une partie de la population se rendait compte de la disparition d'un fort héritage lorsque certains quartiers historiques comme West Village à New York ou North End à Boston étaient menacés par des démolitions pour des projets d'autoroutes, et de renouvellement urbain, et consternés par les démolitions et les relogements qui accompagnaient les projets routiers du gouvernement, de nombreux activistes commençaient à protester contre les projets d'autoroutes urbaines (Jacobs, 1961). Les projets autoroutiers devaient suivre de plus en plus d'étude d'impact sur les aspects environnementaux et sociétaux et il était de moins en moins socialement accepté de reloger des personnes pour construire de nouvelles infrastructures. On observe toujours de nombreux projets d'élargissement d'autoroutes à travers le pays mais l'intérêt de ces travaux semble avoir diminué globalement.

1.1.1.7 Le retour du rail

A partir des années 1980, de nombreuses lignes de transport par rail ont refait leur apparition dans le pays. Dans la plupart des cas, celle-ci utilisaient les mêmes rails que le transport de fret, et étaient pensées comme une alternative à un élargissement autoroutier qui n'était plus possible, cela dans le but d'améliorer la circulation sur les autoroutes aux heures de pointe. Elles étaient en service seulement aux heures de pointe, quand l'autoroute était saturée. Ces lignes ne peuvent pas constituer un réseau de transport durable qui diminue vraiment l'usage de l'auto car les trains faisaient globalement le trajet de la banlieue au centre d'affaire le matin, restaient garés la journée dans un grand dépôt au centre-ville, et faisaient le trajet inverse le soir.

Dans les années 1990, un autre type de transport par rail a refait son apparition dans de nombreuses villes comme Portland, dans la banlieue de New York ou à Cleveland : les trains légers, similaires au tramway. Le problème étant que ces projets ont connu des subventions pour la phase de construction, mais pas d'opération, le service sur ces lignes était régulièrement aux trente minutes ou plus. De plus, un problème récurrent est que ces lignes opèrent comme des systèmes isolés, avec un faible système de bus de rabattement, donc ne profitant que pour les personnes qui vivent à une distance de marche raisonnable des arrêts. Ce nombre de personnes étant d'autant plus petit que les banlieues sont relativement peu denses (English, 2018).

En somme, malgré un retour mesuré en Amérique du Nord comparativement à ce que l'on observe dans d'autres parties du monde, les transports en commun semblent bien avoir fait leur retour et les projets de grande ampleur se multiplient. On peut penser à Los Angeles, qui développe un réseau de transport sur rail que l'on aurait à peine pu imaginer il y a quelques années, mais d'autres villes comme Dallas ou Seattle développent aussi des projets de transport sur rail très prometteurs qui jouent un rôle dans le renouvellement des quartiers centraux.

1.1.1.8 Conclusion de l'Histoire des transports en Amérique du Nord

Les enseignements que l'on vient d'évoquer montrent bien l'importance de garantir un bon niveau de service pour attirer les utilisateurs. Le problème qui semble avoir été rencontré de nombreuses fois dans l'histoire est que lorsque les utilisateurs commençaient à se tourner vers l'automobile, les compagnies de transport ont régulièrement diminué leur niveau de service pour rester viable économiquement. Cela a entraîné un cercle vicieux qui faisait diminuer le nombre d'utilisateurs du transport en commun, et baisser le niveau de service, jusqu'à un point où tous ceux qui pouvaient se permettre de conduire le faisaient. Ces circonstances semblent inévitables dans le contexte économique et social dans lequel elles ont eu lieu. Pour remettre en perspective, lorsque l'on évoque les villes nord-américaines qui ont démantelé leurs réseaux de tramways, il est important de reconnaître que cette tendance n'était pas exclusive à ces villes. De nombreuses autres villes dans le monde ont pris des décisions similaires.

La situation est maintenant très différente de celle du début du XX^{ème} siècle, où la principale alternative aux transports en commun était la marche. Les villes ont beaucoup évolué et l'automobile s'est développée. Son adoption a été influencée par différents facteurs économiques et sociaux. Un facteur clé réside dans l'âge des villes : les plus anciennes, construites avant l'avènement de la voiture, ont tendance à être plus compactes, car les habitants devaient se déplacer à pied. En revanche, de nombreuses villes nord-américaines ont connu une croissance rapide à une époque où la voiture était prédominante. Par exemple, Calgary est passée de 130 000 habitants en 1950 à 1,5 million en 2020, ce qui reflète cette expansion urbaine axée sur la voiture. Le développement de l'automobile a modifié en profondeur le cadre urbain dans lequel nous vivons et a contribué à rendre les alternatives toujours moins attractives, à tel point qu'elle est presque devenue la seule option disponible. Néanmoins ce système pose de nombreux problèmes de durabilité. Des changements sont toujours possibles mais ne se feront pas du jour au lendemain. A

travers cette réflexion, ce mémoire étudie le potentiel d'une solution qui pourrait permettre de créer un transfert modal de l'automobile vers des modes plus durables.

1.1.2 Le contexte Montréalais

Montréal, avec ses particularités historiques, géographiques et sociales, offre un cadre unique pour comprendre les dynamiques de transport urbain. L'étude de son réseau de transport, de ses infrastructures cyclables et des habitudes de déplacement permet de mieux saisir les enjeux spécifiques de la mobilité durable dans cette métropole, qui sert de terrain d'analyse pour cette recherche.

1.1.2.1 Réseau de transport en commun

Le réseau de transport en commun de Montréal joue un rôle déterminant dans la mobilité quotidienne des habitants de la métropole. Au cœur de ce réseau, le métro de Montréal, entièrement souterrain et opéré sur pneus, est géré par la Société des transports de Montréal (STM). Ce réseau comprend quatre lignes, totalisant 68 stations, parmi lesquelles quatre permettent des correspondances inter-lignes et cinq offrent des connexions intermodales avec le réseau de trains de banlieue (<https://www.stm.info/fr>).

Actuellement en construction, le Réseau express métropolitain (REM) représente une nouvelle ligne de métro léger automatisé qui ajoutera 26 stations universellement accessibles, étendant ainsi le réseau à travers le Grand Montréal (<https://rem.info/fr>).

Au-delà du métro, la STM administre également un réseau de 221 lignes de bus desservant Montréal, avec des lignes fréquentes et un service nocturne. Dans les municipalités voisines, la Réseau de transport de Longueuil (RTL) exploite 81 lignes régulières (<https://www.rtl-longueuil.qc.ca/fr>), et la Société de transport de Laval (STL) gère 47 lignes d'autobus (<https://stlaval.ca/>).

Le transport régional est complété par Exo, qui gère les services de trains et d'autobus de banlieue ainsi que le transport adapté pour la Communauté métropolitaine de Montréal. Le réseau d'Exo inclut 5 lignes de trains, 52 gares, et une flotte extensive d'autobus et de taxibus (<https://exo.quebec/fr>).

1.1.2.2 Réseau cyclable

Le réseau cyclable de Montréal a connu une expansion significative ces dernières années. Selon le rapport de Vélo Québec de 2020, le réseau compte désormais 1001 km de voies cyclables, marquant une augmentation de 34% depuis 2015. Ce réseau comprend 287 km de pistes en sites propres, où les cyclistes peuvent rouler à l'écart de la circulation motorisée, 104 km de pistes sur rues protégées par des séparateurs physiques, 334 km de bandes cyclables délimitées sur la chaussée, et 276 km de chaussées désignées qui sont des rues ou routes à faible débit de circulation partagées par les vélos et les automobilistes et officiellement reconnues comme voie cyclable, avec un marquage au sol sensibilisant les automobilistes à la présence des cyclistes et indiquant le cheminement aux cyclistes.

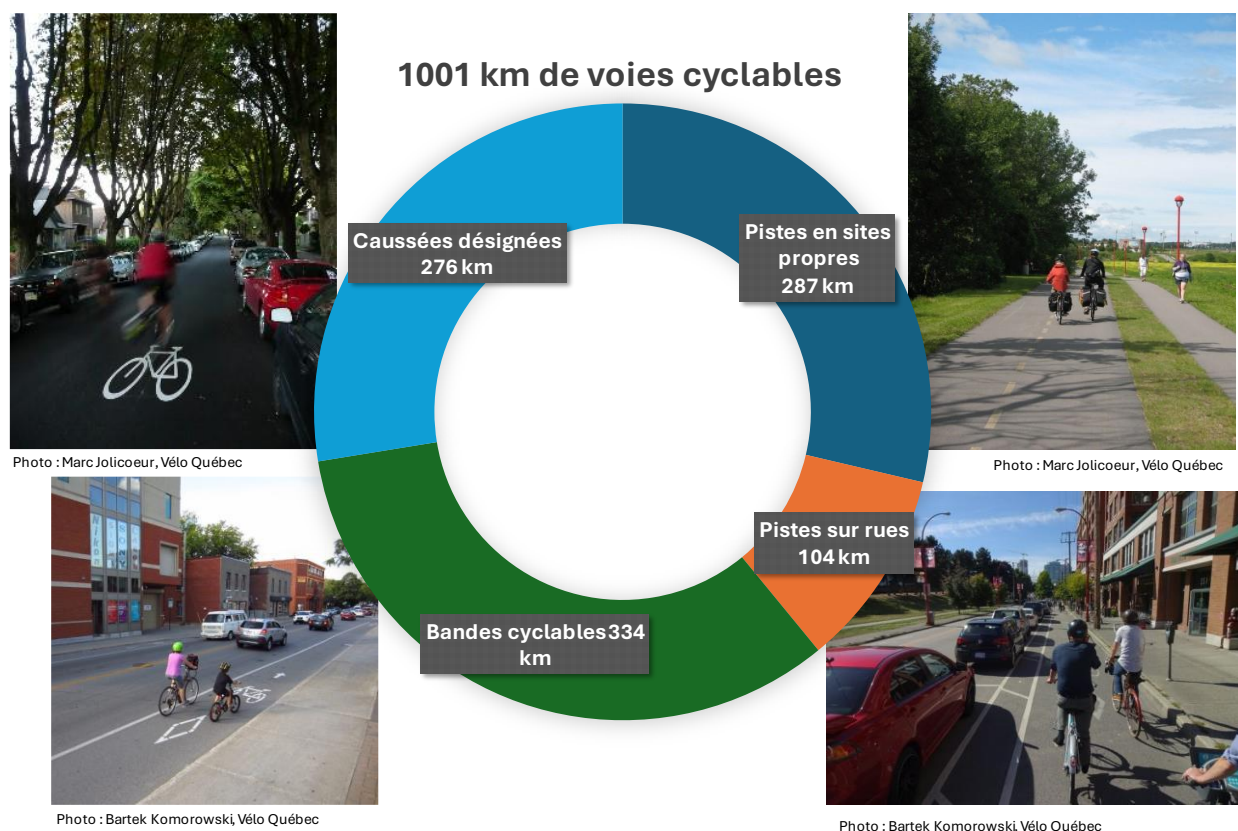


Figure 1.1 Répartition du réseau cyclable par type de voie (Vélo Québec)

L'effort pour rendre le réseau cyclable accessible toute l'année s'est également intensifié, avec 630 km de voies entretenues pendant l'hiver en 2020, contre seulement 42 km en 2010.

BIXI Montréal, implanté en 2009 est le système de vélopartage de la ville. En 2024, ce réseau étendu compte plus de 11 000 vélos, dont 2 600 BIXI électriques, et plus de 900 stations réparties à Montréal mais aussi dans des zones adjacentes telles que Laval, Longueuil, Boucherville, Terrebonne, Sainte-Julie, Westmount, Ville de Mont-Royal et Montréal-Est. Ce service est depuis l'hiver 2024 disponible à l'année (<https://bixi.com/fr/>).

Enfin, le Réseau express vélo (REV) est une initiative qui vise à améliorer le réseau cyclable montréalais. Prévu pour s'étendre sur 191 km, le REV est conçu comme un réseau de voies cyclables hautement sécurisé et efficace, reliant divers points d'intérêt à travers la ville. Ces voies sont protégées et destinées à être utilisées tout au long de l'année, assurant ainsi une séparation claire et sécurisée entre les cyclistes et les autres modes de transport. Les caractéristiques distinctives du REV incluent des voies de grande capacité qui permettent des déplacements rapides et des dépassements relativement aisés (<https://montreal.ca/articles/le-rev-un-reseau-express-velo-4666>).

En 2020, Montréal comptait 25 000 places de stationnement pour vélos, contre 21 000 en 2015 d'après le rapport sur l'état du vélo à Montréal de Vélo Québec. Au niveau des stations de métro, 2 900 places sont disponibles, un chiffre inchangé depuis 2010 d'après ce rapport. Toutefois, ces chiffres doivent être interprétés avec prudence, car il n'existe pas d'inventaire exhaustif des supports à vélos, que ce soit sur le domaine public ou privé, ce qui limite la fiabilité des estimations. En comparaison on compte, selon les estimations, entre 475 000 à 515 000 places de stationnement pour voitures sur le territoire de Montréal en 2016 d'après la politique de stationnement de la ville.

1.1.2.3 Habitudes de déplacement

L'enquête Origine-Destination (OD) de 2018, menée par l'Autorité Régionale de Transport Métropolitain (ARTM), offre un aperçu détaillé des habitudes de déplacement dans la région métropolitaine de Montréal. Cette enquête révèle plusieurs tendances significatives impactant la mobilité quotidienne des résidents.

Actuellement, dans la grande région de Montréal, environ 8,1 millions de déplacements quotidiens sont effectués tous modes confondus. Selon les données de 2018, 31 % de ces déplacements sont réalisés via le transport collectif et les modes actifs, tandis que les véhicules motorisés représentent 69 % des déplacements.

En outre, les déplacements en direction du centre-ville de Montréal pour le travail ou les études durant cette période sont majoritairement effectués en transport collectif, représentant 74 % des trajets. Le centre-ville demeure le principal pôle d'emploi, attirant 21 % des déplacements pour le travail, tandis que les couronnes périphériques enregistrent une augmentation de 12 % des déplacements en période de pointe matinale pour le travail, reflétant une diversification et une expansion géographique des activités économiques.

D'un point de vue démographique et social, la région a vu sa population augmenter de 3 % entre 2013 et 2018, avec un vieillissement continu de cette dernière et une stagnation de la taille moyenne des ménages à 2,36 personnes (Autorité régional de transport métropolitain, 2018).

Il est important de souligner que ces résultats ont été publiés avant la pandémie de Covid 19, et que les habitudes de déplacement ont depuis été bouleversées.

Déplacements en transport en commun

L'enquête OD 2018 de l'ARTM offre un aperçu détaillé des profils des usagers du transport collectif à Montréal. Parmi la population, les femmes se démarquent en représentant 54 % des usagers du transport collectif, elles sont plus susceptibles d'utiliser ce mode de transport que les hommes, alors qu'elles représentent 51% de la population totale. De même, les individus de moins de 45 ans, qui constituent 53 % de la population, sont particulièrement actifs dans l'utilisation des transports collectifs, représentant 70 % de ses usagers. En ce qui concerne les étudiants, bien qu'ils ne représentent que 22 % de la population totale, ils forment 36 % des utilisateurs du transport collectif.

Déplacements à vélo

À Montréal, l'utilisation du vélo connaît une croissance significative. Selon le rapport de Vélo Québec de 2020, 57% des adultes montréalais ont utilisé un vélo au moins une fois durant l'année, et 21% envisagent de commencer à faire du vélo. Cette tendance est en hausse dans toutes les catégories d'âge, avec notamment une augmentation notable chez les personnes de 55 ans et plus, passant de 31% en 2010 à 39% en 2020, et chez les 18-34 ans, de 66% en 2010 à 72% en 2020.

La répartition par sexe montre que 67% des hommes contre 48% des femmes ont fait du vélo en 2020. En semaine, hors période hivernale, 68% des cyclistes adultes utilisent leur vélo comme

moyen de transport au moins une fois. La plus forte concentration de cyclistes se trouve près du centre-ville, avec des taux de cyclisme les plus élevés pour des trajets de 1 à 8 km.

Les données de Vélo Québec révèlent également des disparités entre les sexes dans l'utilisation du vélo selon les quartiers. Les quartiers centraux, bien pourvus en voies cyclables, présentent un ratio hommes/femmes plus équilibré (1.2 au Plateau Mont Royal et 1.3 à Rosemont), comparé à des secteurs plus éloignés où ce ratio atteint 1.9 et 1.7.

Malgré la saison hivernale, 13.6% des cyclistes continuent à utiliser leur vélo, représentant environ 60 000 personnes, ce qui montre une nette augmentation par rapport aux 7.6% de 2018-2019.

Sur le plan de la sécurité, une amélioration significative a été observée entre 2000 et 2020 : malgré une augmentation de 51% du parc automobile et de 29% du nombre de cyclistes, le nombre de cyclistes blessés grièvement a diminué de 62%. D'après Vélo Québec, cette amélioration est attribuable à l'expansion des infrastructures cyclables sécurisées, qui ont connu une croissance de 111% durant cette période.

La majorité des déplacements à vélo en 2020 se sont effectués sur des voies cyclables (62%), contre 35% dans les rues à faibles circulation et 11% dans les rues à forte circulation, montrant une nette préférence pour les itinéraires sécurisés.

Enfin, le service de vélopartage Bixi a connu une hausse notable de 62% de ses déplacements entre 2015 et 2019, bien que 2020 ait vu une baisse en raison des impacts de la pandémie de Covid-19.

1.1.2.4 Investissements et tendances actuelles

Dans son programme de budget décennal, Montréal vise à modifier en profondeur les habitudes de transport vers un modèle plus durable. La ville se propose d'accroître la part modale des déplacements à vélo à 15% d'ici dix ans. De telles parts modales sont observées par exemple à Munich. Cette ville allemande, dotée de caractéristiques démographiques et de densité proches de Montréal, a investi environ 32 millions d'euros entre 1992 et 2010 pour développer un réseau cyclable dépassant les 1 200 km, soit plus de la moitié de la longueur totale de son réseau routier. En 2012, Munich offrait aussi une infrastructure importante pour le stationnement des vélos, comprenant 32 000 racks à vélo et 50 000 places de stationnement près des points de transport en commun.

Les objectifs de Montréal sont ambitieux car cela revient à multiplier par 5 la part modale du vélo en 10 ans. Pour atteindre de telles ambitions, Montréal a planifié un investissement significatif dans son Programme décennal d'immobilisation (Mairie de Montréal, 2023), dédiant 507,1 millions de dollars canadiens au développement cyclable sur dix ans. Ce montant, bien que conséquent, représente 8,5% du budget total alloué aux routes pour la période 2023-2033, une part qui marque une nette augmentation par rapport aux 3,3% de 2022. À titre comparatif, les investissements pour contrer les nids-de-poule se chiffrent à 880 millions de dollars canadiens sur la même période, soulignant l'importance de l'entretien du réseau routier dans les politiques urbaines.

Parallèlement, le gouvernement provincial du Québec a augmenté son budget annuel pour le transport actif à 55 millions de dollars, ce qui représente 1,6% de son budget total pour les routes et le transport actif en 2023-2024. En outre, dans son budget d'infrastructures pour les 10 prochaines années, le gouvernement du Québec compte investir 2,5 fois plus d'argent dans les routes (34,5 milliards) que dans le transport collectif (13,8 milliards).

Enfin, Vélo Québec, dans son rapport de 2020, a mis en lumière les défis et les axes d'amélioration nécessaires, plaidant pour un réseau cyclable accessible toute l'année et 100% des rues aménagées pour le vélo ou régulées pour modérer la circulation.

1.1.2.5 Comparaison avec d'autres villes

La comparaison des habitudes de transport entre différentes villes nécessite une approche et une interprétation nuancée, considérant les diversités historiques, géographiques et contextuelles. Montréal, par exemple, montre des disparités significatives au sein même de son territoire métropolitain.

A partir de différentes données de recensement, nous avons établi un cadre comparatif. Pour cela, nous avons sélectionné des villes en Amérique du Nord et en Europe qui partagent des caractéristiques similaires en termes de population et de densité à l'échelle métropolitaine, et nous avons concentré notre analyse sur les parts modales du transport en commun et du vélo.

Tableau 1.1 Comparaison des parts modales de différentes métropoles

		Population (en milliers)	Densité (hab/km ²)	part modale TC (%)	part modale vélo (%)	Sources
Amérique du Nord	Montréal	1 763	4 828	24	3,3	(Statistics Canada, 2021)
	Toronto	2 794	4 427	26	2	(Statistics Canada, 2021)
	Vancouver	662	5 750	23	5	(McElhanney in Association with Mustel Group, 2019)
	Seattle	737	3 388	10	1	(Census Reporter, 2018)
Europe	Munich	1 512	4 900	24	18	(Presse-Service Wien, 2022)
	Manchester	550	4 755	18	5	(Deloitte Insight, 2023)
	Milan	1 371	7 500	41	10	(Città metropolitana di Milano., 2021)
	Oslo	709	1477	30	6	(Deloitte Insight, 2023)
	Stockholm	985	5 200	47	7	(Deloitte Insight, 2023)
	Hamburg	1 946	2 600	24	22	(Deloitte Insight, 2023)

Parmi les villes canadiennes, Montréal est similaire à Toronto et Vancouver pour ce qui est des parts modales. Toutefois, il apparaît que les villes nord-américaines, en général, tendent à avoir des parts modales vélo et transport en commun inférieures à celles observées dans les villes européennes. Cette tendance n'est pas universelle et des exceptions, telles que Manchester en Europe, affichent des parts modales vélo comparables à celles de Montréal et une part modale de transport en commun même inférieure, illustrent la complexité des comparaisons interurbaines.

1.2 Énoncé du problème

La complémentarité entre vélo et transport en commun est un levier sous-exploité pour réduire l'usage de la voiture en ville. Toutefois, peu de recherches proposent des outils pratiques et simples pour mesurer cette accessibilité.

L'étude du partage de la voirie à Montréal met en évidence une disparité marquée dans la répartition de l'espace entre différents modes de transport. Une étude réalisée par Lefebvre-Ropars (2021) révèle que l'espace alloué à l'automobile représente en moyenne 73,8 % de la surface totale de la voirie. En comparaison, les espaces dédiés aux transports collectifs et aux vélos occupent seulement 1,0 % et 1,3 % respectivement, tandis que les zones piétonnes constituent 18,8 % de l'espace. Cette prédominance de l'automobile souligne un déséquilibre significatif et encourage une révision des politiques urbaines pour promouvoir une mobilité plus équilibrée et durable face aux défis de congestion, pollution et de santé publique.

Les documents de planification actuels, tant au Québec qu'ailleurs, incluent souvent des objectifs visant à améliorer le partage de l'espace entre piétons, cyclistes, usagers du transport collectif et automobilistes. Néanmoins, alors que de nombreuses politiques encouragent à réduire la part modale de l'automobile en milieu urbain, les interactions entre les modes de transport alternatifs ne sont pas bien comprises. La diminution de l'utilisation de la voiture devrait théoriquement se

traduire par un transfert vers des modes plus durables, comme le transport collectif, le vélo ou la marche.

Dans un contexte où la réduction de l'usage de l'automobile en milieu urbain devient cruciale, les transports en commun (TC) et le vélo représentent deux modes de transport durable qui peuvent se renforcer mutuellement. Les transports en commun sont efficaces pour les trajets de moyenne à longue distance, mais leur accessibilité reste souvent limitée par la distance entre les stations et les habitations. Le vélo comble cette lacune en étendant le rayonnement des stations au-delà des zones de marche, permettant ainsi de relier des résidents ou usagers situés à quelques kilomètres des stations de métro et de bus. Cette multimodalité n'est pas toujours bien intégrée dans les études de mobilité, et il est essentiel d'approfondir notre compréhension des interactions entre différents modes pour améliorer leur complémentarité et leur efficacité.

1.3 Objectifs de la recherche

Ce mémoire vise à caractériser la complémentarité entre les transports en commun et le vélo. Les principaux objectifs de cette recherche sont de comprendre comment, en pratique, ces deux modes de transport interagissent pour encourager un transfert modal durable.

Cette étude est d'autant plus pertinente que l'accès aux transports en commun est nettement amélioré par l'utilisation du vélo, étendant ainsi leur portée et augmentant leur efficacité pour desservir un plus grand nombre d'usagers via des infrastructures lourdes déjà en place. Au cœur de cette étude se trouve la question de recherche suivante : « Comment l'amélioration de l'intermodalité, notamment par une meilleure intégration du vélo avec les transports en commun, peut-elle accroître la portée et l'efficacité des réseaux de transport collectif ? » Pour aborder cette question, ce mémoire apporte une contribution en développant une méthodologie pour calculer les bassins d'attraction cyclables, intégrant des critères de sécurité pour les cyclistes. Cette méthode est appliquée pour évaluer l'accessibilité cyclable aux stations de métro à Montréal. De plus, des indicateurs dédiés à la caractérisation de cette accessibilité sont proposés, et divers scénarios sont élaborés pour examiner les bénéfices d'une amélioration du réseau cyclable. Cette méthodologie vise à proposer une carte de l'accessibilité cyclable autour des stations, pour mieux cibler les aménagements nécessaires.

Dans une réflexion plus large, une compréhension de la complémentarité des modes sera apportée, pour évaluer comment les améliorations apportées à l'infrastructure cyclable influencent

l'utilisation des transports en commun. Cela permet de comprendre si des investissements ciblés dans le cyclisme urbain peuvent, par effet indirect, stimuler l'usage des transports en commun, et inversement.

En améliorant les infrastructures cyclables, l'étude postule qu'on ne favorise pas seulement l'utilisation du vélo mais on renforce également l'attrait des transports en commun. Cette synergie peut réduire la dépendance à l'automobile et encourager des comportements de mobilité plus durables, créant un écosystème de transport cohérent et efficace.

La partie cohabitation analyse la relation spatiale entre le vélo et les transports en commun lorsque ces modes ne sont pas utilisés conjointement pour un même trajet. Cette partie de l'étude se concentre sur les interactions et conflits potentiels, comme les croisements entre bus et voies cyclables ou les défis des voies partagées entre les bus et les vélos. Cette analyse s'inscrit dans un contexte plus large de gestion de l'espace urbain, cherchant à promouvoir un partage équitable de la rue qui minimise les conflits et favorise une coexistence harmonieuse.

Une autre dimension de cette recherche est l'examen de la complémentarité temporelle entre les différents modes de transport. Cette approche cherche à comprendre si les usagers adaptent leur mode de transport — optant pour le vélo en été et les transports en commun en hiver — en réponse aux variations climatiques et à la disponibilité des infrastructures. Cette analyse est cruciale pour déterminer si les politiques de transport actuelles répondent de manière flexible aux besoins saisonniers des usagers.

1.4 Structure du mémoire

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres principaux. Le premier chapitre, introduit le contexte et les objectifs de l'étude. Le deuxième chapitre fournit un état des connaissances concernant l'intermodalité, la complémentarité et la cohabitation entre les différents modes de transport, soulignant les enjeux et les connaissances actuelles liés à ces thèmes. Le troisième chapitre détaille la méthodologie adoptée pour atteindre les objectifs de l'étude, en expliquant les sources des données utilisées, ainsi que la démarche méthodologique pour la délimitation des bassins d'attraction cyclable autour des points d'accès aux transports en commun. Cette section décrit également les indicateurs utilisés pour évaluer la qualité des accès aux transports en commun ainsi que les scénarios développés. Le quatrième chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus à travers ces indicateurs, en évaluant leur pertinence et les constats qu'ils fournissent sur

l'intermodalité et la mobilité urbaine. Enfin, le cinquième chapitre conclut le mémoire, en résumant les contributions majeures de cette recherche, en discutant les limites rencontrées durant l'étude, et en proposant des perspectives pour de futures recherches dans ce domaine.

CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

La revue de littérature proposée dans ce chapitre est composée de cinq sections qui correspondent chacune aux objectifs formulés précédemment. Tout d'abord, la première section explore le concept de développement durable ainsi que les défis posés par la prédominance de l'automobile en milieu urbain. Ensuite, la deuxième section examine les interactions entre le vélo et les transports en commun, en définissant leurs relations et en analysant leur potentiel complémentaire pour une mobilité urbaine plus efficace. La troisième section se concentre sur l'intermodalité, en particulier les dispositifs tels que le "Bike and Ride" et les systèmes de vélos partagés, qui permettent d'améliorer l'accès aux transports en commun. La quatrième section aborde la cohabitation des différents modes de transport dans l'espace urbain, en analysant les conflits et les solutions pour une répartition plus équilibrée de l'espace public. Enfin, la cinquième section s'intéresse aux dynamiques de complémentarité, de compétition et de multimodalité entre les modes de transport, en étudiant comment ils peuvent se combiner pour encourager une mobilité plus durable.

2.1 Le développement durable

Le développement durable est un concept qui cherche à concilier la croissance économique, la protection de l'environnement et le bien-être social. Sa définition la plus largement reconnue provient du rapport Brundtland de 1987, intitulé "Notre avenir à tous" (World Commission on Environment and Development, 1987). Ce rapport définit le développement durable comme "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs". Cette définition montre qu'en plus des préoccupations économiques, on souhaite intégrer les préoccupations environnementales et sociales au processus décisionnel.

Le concept repose sur trois piliers fondamentaux :

Économie : Le développement durable promeut une croissance économique qui n'épuise pas les ressources naturelles et qui assure une prospérité à long terme. Cela concerne à la fois l'individu et la collectivité, en prenant en compte les coûts et dépenses directes, les revenus directs et des retombées économiques (WCED, 1987).

Environnement : La protection de l'environnement est essentielle pour préserver les écosystèmes et la biodiversité. Cela inclut la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la protection des

ressources en eau, la gestion durable des terres et la conservation des habitats naturels (Commission des Nations Unies sur le développement durable, 1992).

Social : L'équité sociale est au cœur du développement durable. Cela implique la lutte contre la pauvreté, l'amélioration de l'accès à l'éducation, à la santé, et aux conditions de vie décentes, tout en respectant les droits humains et les cultures locales (United Nations Conference on Environment and Development, 1992).

2.1.1 En quoi la prédominance de l'automobile en milieu urbain pose des problèmes de développement durable ?

On retrouve des éléments de réponse dans les trois aspects du développement durable.

Avant tout, il convient de signaler que bien que cette étude mette l'accent sur les impacts négatifs, nous reconnaissons que l'automobile offre des avantages significatifs pour certaines personnes et dans certaines situations. Elles relient des villes isolées et des zones rurales. Les voitures peuvent également fournir un moyen de transport pour les personnes ayant des handicaps physiques (Power, 2016). L'intérieur d'une voiture peut être un lieu de conversation, d'écoute musical, de confidentialité, de sécurité (Dobbs, 2005). Les voitures peuvent influencer le sentiment d'identité des individus et remplir des fonctions symboliques et affectives (Steg, 2005). Ces avantages sont importants pour les personnes concernées et les interventions visant à réduire les nuisances automobiles doivent en tenir compte. La critique est plus tournée vers certaines métropoles « tout voiture » où ce véhicule n'est pas un choix mais est le mode de déplacement par défaut, à tel point que les autres modes sont souvent qualifiés de « modes alternatifs ».

Économie

Comme le souligne le rapport réalisé par Benatia et al. (2014), le coût économique de l'automobile à Montréal est très élevé. Cette étude évalue pour la première fois de manière exhaustive les coûts sociaux et gouvernementaux de chaque mode de transport sur l'île de Montréal. L'étude conclut que l'automobiliste montréalais impose un coût trois fois supérieur à la société par rapport à l'utilisateur des transports en commun, et bien plus encore en comparaison avec les cyclistes et les piétons.

D'un point de vue des dépenses gouvernementales, un automobiliste coûte à l'État environ 2 595 \$ annuellement, tandis que l'utilisateur du transport collectif coûte légèrement moins, à 2 543 \$. Les

cyclistes et les piétons représentent des coûts bien moindres, avec respectivement 786 \$ et 210 \$ en dépenses directes par an. Ces chiffres prennent en compte l'amortissement des infrastructures, l'entretien, le déneigement, et les coûts opérationnels.

Le coût social externe, qui inclut les impacts de la pollution, la congestion, les accidents, et les effets sur la santé, révèle des disparités encore plus marquées. Le coût externe de l'automobile atteint 6 419 \$ par automobiliste par année, tandis que les usagers du transport collectif génèrent des bénéfices sociaux, et les cyclistes et piétons contribuent positivement grâce aux avantages pour la santé. En totalité, le coût social d'un automobiliste s'élève à environ 9 014 \$ annuellement, comparé à 2 449 \$ pour un usager du transport en commun. Les cyclistes et piétons, grâce aux bénéfices sanitaires, présentent un bilan positif pour la société.

Pour l'utilisateur, l'automobile est également la plus coûteuse, avec un coût moyen de 15 720 \$ par an pour la possession d'un véhicule à Montréal en 2024, soit 1310 \$ par mois (Gauthier, 2024), alors que l'usager du transport collectif dépense environ 580 \$ annuellement. Le prix moyen pour la possession d'une automobile a augmenté de 68% depuis 2019. Pour l'utilisation de BIXI à l'année, c'est un montant minimal de 250 \$ qui doit être déboursé (BIXI. Tarifs. <https://bixi.com/fr/abonnement-saisonnier/>). C'est légèrement plus élevé que la moyenne du coût privé annuel de l'usage du vélo par ménage au Québec de 178 \$ (Vélo Québec, 2020a), même si cette moyenne cache probablement de grandes disparités.

Miner et al. (2024) explorent et catégorisent les conséquences négatives de la prédominance de l'automobile. Leur recherche sert de cadre pour détailler les effets néfastes de l'automobile d'un point de vue sociétal et environnemental.

Environnement

L'automobile contribue à la pollution de l'air, des sols et des eaux. Ces formes de pollution peuvent être nocives pour la nature ainsi que la santé humaine.

Au niveau du changement climatique, l'automobile est un des principaux émetteurs de GES. Au Québec, 34% des émissions totales de GES provient du transport routier (Gouvernement du Québec, 2021).

De plus, la pollution issue des gaz d'échappement des moteurs et de l'abrasion des matériaux tels que les pneus et les plaquettes de frein représente une source majeure de pollution environnementale. Ces émissions libèrent une variété de gaz nocifs et une quantité considérable de

particules fines (Masiol et al., 2014 ; Harrison et al., 2021). Cette pollution est associée à un risque accru de maladies respiratoires et circulatoires, y compris le cancer et divers troubles neurologiques (Attademo et al., 2017 ; Boogaard et al., 2022). Les auteurs notent que bien que les véhicules électriques puissent réduire la pollution liée aux gaz d'échappement, ils risquent d'aggraver la situation concernant les particules fines, car ces véhicules, étant plus lourds, génèrent davantage d'abrasion des matériaux (Harrison et al., 2021). Parmi les microplastiques primaires (particules relâchées directement plutôt que provenant de la décomposition de plastiques plus grands) rejetés dans l'océan, les pneus représentent environ 35 % de ces émissions (Boucher & Friot, 2017).

On exploite des ressources pour différentes étapes du cycle de vie des véhicules incluant l'extraction de pétrole et l'exploitation minière pour les métaux. Le pétrole sert non seulement à produire du carburant mais aussi des plastiques pour la fabrication des véhicules. Les activités minières servent à extraire les métaux utilisés dans la construction. Ils ont un impact significatif sur plusieurs aspects environnementaux, notamment la qualité de l'air, la qualité et le besoin en eau, les impacts sur les terres et d'autres impacts écologiques (Jain et al., 2016). Avec l'électrification croissante des marchés automobiles, les activités d'extraction de métaux sont susceptibles de s'accroître à moins que l'adoption de matériaux recyclés ne devienne plus répandue (Kosai et al., 2021).

L'utilisation de sel de déneigement pour faire fondre la glace et la neige contamine les écosystèmes d'eau douce et rend certaines sources d'eau impropres à la consommation (Dugan et al., 2017).

Le réseau routier et le tissu urbain affectent la faune à travers plusieurs facteurs : les collisions, la perte et la fragmentation des habitats, la pollution (Dolan et al., 2006).

Les surfaces pavées comme les routes et les stationnements augmentent la température locale de l'air et des surfaces. Ce phénomène d'îlot de chaleur peut affecter négativement la santé en accentuant les vagues de chaleur et la pollution de l'air, provoquant des malaises, des coups de chaleur et d'autres problèmes de santé graves (Basu & Samet, 2002 ; Khosla et al., 2020 ; Li & Bou-Zeid, 2013). De plus les routes et les constructions de faible densité sont habituellement imperméables à l'infiltration d'eau, augmentant ainsi le ruissellement et les risques d'inondations (Himanshu, 2024).

Social

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, les accidents de la route tuent environ 1,3 million de personnes par an dans le monde, soit à peu près 3 500 personnes par jour. Ils entraînent également un nombre considérable de blessures graves et permanentes (World Health Organization, 2018). Bien que les innovations en matière de sécurité aient ralenti l'augmentation du nombre de décès liés aux accidents par rapport à l'augmentation globale du volume de circulation dans le monde, cette tendance s'est depuis récemment inversée aux États-Unis où le taux de mortalité a grimpé dans les dernières années (National Highway Traffic Safety Administration, 2021). Les auteurs de l'étude attribuent cela en partie à la préférence des conducteurs américains pour des véhicules plus grands et plus lourds.

La circulation automobile constitue la principale source de nuisance sonore dans les zones urbaines (Khan et al., 2018). Ce bruit provient principalement des moteurs des véhicules, surtout à basse vitesse, tandis que le bruit de roulement prédomine à des vitesses plus élevées. Même les véhicules électriques ne résolvent pas ce problème, car le bruit de roulement devient prédominant pour des vitesses supérieures à 50 km/h (Heutschi et al., 2016). Les impacts sanitaires de cette pollution sonore sont multiples : augmentation de la tension artérielle, acouphènes, perte d'audition, anxiété, stress, perturbations du sommeil et altération des capacités cognitives (W. Allen & D. Adar, 2011 ; van Kempen et al., 2002). Les villes en elles-mêmes ne sont pas bruyantes; ce sont les automobiles qui sont bruyantes.

Un autre impact social significatif de l'automobile est le comportement sédentaire qu'elle encourage, ce qui augmente les risques de maladies cardiovasculaires et autres pathologies liées à l'inactivité (Bull et al., 2020). À l'opposé, les personnes qui marchent ou font du vélo régulièrement bénéficient d'une amélioration notable de leur santé physique et mentale (Bull et al., 2020 ; Johansson et al., 2019). Cette tendance est particulièrement préoccupante chez les enfants aux États-Unis, où la proportion de ceux qui marchent ou vont à l'école à vélo a drastiquement chuté, passant de 48% dans les années 1970 à environ 11% en 2017 (Kontou et al., 2020). Même l'utilisation du transport en commun, qui est sédentaire lorsque le passager est dans le véhicule, encourage un comportement actif pour l'accès au transport en commun au début, à la fin du trajet et lors des correspondances (Morabia et al., 2010 ; Morency et al., 2011).

L'inaccessibilité liée à l'automobile se manifeste sous deux formes principales. D'une part, l'environnement urbain conçu autour de l'automobile intègre intrinsèquement des obstacles et des

dangers qui affectent particulièrement les personnes avec des handicaps physiques, visuels ou auditifs (Hamraie, 2017). Ces barrières limitent non seulement l'accès physique mais renforcent également l'isolement social de ces groupes vulnérables.

D'autre part, l'automobile crée une forme d'exclusion moins visible mais tout aussi néfaste : elle restreint l'accès aux personnes qui ne peuvent pas se permettre une voiture ou qui choisissent de ne pas en utiliser une (Urry, 2006). « En promettant la réduction des distances, l'automobile tend en réalité à privilégier les déplacements de certains au détriment des autres » (Rachel & Woodcock, 2008).

L'automobile consomme du temps pour les conducteurs à travers divers processus, incluant la congestion, la recherche de places de stationnement, et les réparations nécessaires. Illich, dans les années 1970, observait que « l'homme américain typique » passe 4 de ses 16 heures éveillées à conduire ou à accumuler de l'argent pour payer sa voiture (Illich, 1973). La perception du temps en voiture varie ; pour certains automobilistes, le temps passé à conduire peut être agréable et donc peut ne pas être considéré comme « perdu » malgré la congestion et autres facteurs liés au temps (Kent, 2014). Cependant, les piétons, les personnes en fauteuil roulant, les cyclistes ou les usagers des transports en commun ne bénéficient en rien des voitures autour d'eux, mais leurs trajets peuvent être ralentis par la congestion de la circulation (Miner et al., 2024).

2.1.2 L'approche 'Réduire-Transférer-Améliorer'

Lorsque l'on veut diminuer la place de l'automobile, on pense souvent à vouloir effectuer un transfert modal vers des modes plus durable. Mais ce raisonnement rentre dans une approche plus globale qui est la méthode "Réduire-Transférer-Améliorer". C'est une approche hiérarchisée visant à promouvoir une mobilité plus durable. Elle s'articule en trois actions :

1. **Réduire** : Cette étape consiste en premier lieu à éviter ou minimiser le besoin de transport en réduisant le nombre de déplacements nécessaires ou en raccourcissant les distances parcourues. Des solutions comme le télétravail, les bureaux satellites, ou l'aménagement des horaires peuvent diminuer la fréquence et la longueur des déplacements motorisés. L'aménagement du territoire fait aussi partie de la solution, en intégrant les principes des '5D' : diversité des usages du sol, densité, design urbain, proximité des transports en commun et accessibilité aux destinations.

2. **Transférer** : Cette phase vise à transférer les déplacements vers des alternatives ayant un moindre impact global telles que les transports en commun, les modes actifs (vélo, marche) ou d'autres modes alternatifs. L'objectif est d'améliorer la diversité, la qualité et la compétitivité de ces alternatives en améliorant l'offre et l'accessibilité, et en rendant l'usage de l'automobile moins attrayant à travers une tarification adaptée, la limitation du stationnement et une meilleure intégration des divers modes de transport.
3. **Améliorer** : Cette dernière étape se concentre sur l'amélioration de l'efficacité environnementale des déplacements en véhicule privé qui restent nécessaires. Cela inclut l'adoption de technologies plus propres et la réduction des émissions de CO₂.

L'approche "Réduire-Transférer-Améliorer" a été utilisée pour la première fois dans un rapport parlementaire allemand en 1994, comme moyen de catégoriser les options politiques visant à réduire l'impact environnemental du transport. Cette approche a ensuite été adoptée plus largement par les acteurs du transport durable (voir par exemple, Dalkmann et Brannigan (2007) ; Hidalgo et Huizenga (2013)), mais elle a également été étendue à d'autres domaines (voir par exemple Zhu & Ma, 2023).

Le volet 'Transférer' de cette approche implique une compréhension plus fine des différents facteurs qui influent sur le choix du mode de transport lors d'un trajet.

2.1.3 Les déterminants du choix modal

Lors d'un trajet, différents facteurs sociodémographiques et de localisation influencent le choix modal comme le montrent les résultats de l'étude (Beaudin et al., 2024) appliquée à Montréal.

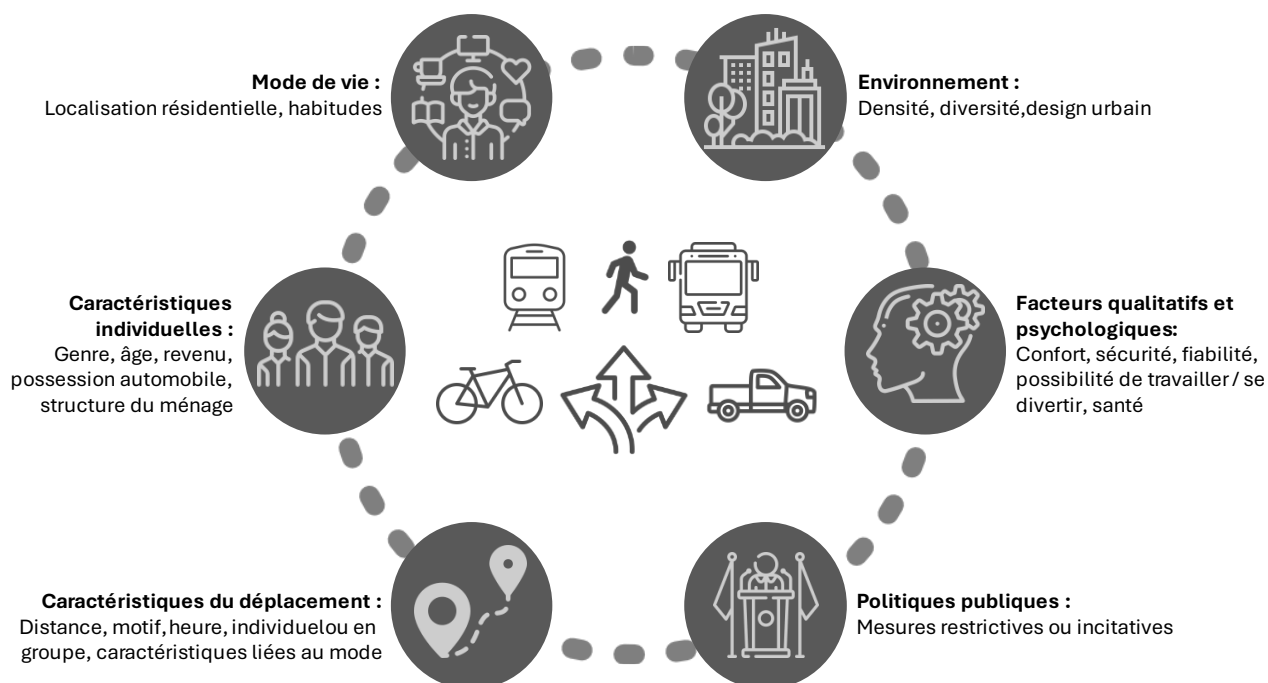


Figure 2.1 Facteurs influençant le choix modal, Courel & Deguire (2020)

Cependant, comme le soulignent Courel & Deguire (2020), les caractéristiques objectives des différents modes de transport, bien qu'essentiels, ne sont pas les seules à influencer les comportements des usagers. Divers facteurs, y compris psychologiques, environnementaux et socioéconomiques, jouent un rôle déterminant dans les choix de transport.

Pour étudier ces influences en détail, les auteurs identifient six catégories principales de déterminants du choix modal. La première catégorie concerne les caractéristiques objectives des modes, comme la durée du trajet, qui est certes importante mais insuffisante pour influencer à elle seule le choix modal. Les usagers valorisent davantage la qualité du temps passé, qui inclut la fréquence et la fiabilité du service des transports en commun, ainsi que les coûts associés représentés par des dépenses fixes et variables.

La deuxième catégorie se concentre sur l'environnement, incluant des éléments tels que la densité urbaine, la diversité des activités dans un rayon restreint et l'urbanisme, qui affectent l'accessibilité et la sécurité des différents modes de transport.

Troisièmement, les aspects psychologiques et sociologiques ainsi que les perceptions personnelles ont une influence prédominante. La façon dont les individus perçoivent et expérimentent leur trajet a une influence marquée sur leurs choix de transport. Cela inclut l'optimisation du temps de trajet, ainsi que la possibilité d'effectuer des activités telles que travailler ou se détendre pendant le trajet en transport collectif. Les représentations sociales associées à chaque mode de transport, comme l'image du vélo ou des transports en commun liée à certaines classes sociales ou celle de la voiture comme symbole de réussite, jouent également un rôle dans les choix modaux. De plus, la perception de la sécurité, du confort et de la liberté offerte par chaque mode, spécifique à chaque individu et à son mode de vie, impacte fortement les décisions.

Enfin, les politiques publiques, telles que le financement des transports collectifs, interagissent avec toutes ces dimensions pour influencer les choix de transport, les ancrant ainsi dans des structures sociales, économiques et culturelles plus larges.

2.2 Les interactions vélo - transport en commun

Cette section explore les interactions essentielles entre le vélo et le transport en commun, en définissant des concepts clés telles que le bassin d'attraction, l'amélioration de la portée et le potentiel latent, cette analyse jette les bases pour mieux comprendre comment ces deux modes peuvent s'intégrer de manière plus cohérente dans les réseaux urbains.

2.2.1 Définition

Une interaction entre modes de transport désigne le processus par lequel différents systèmes, tels que les bus, les trains ou les vélos, collaborent, entrent en compétition, ou coexistent simplement pour permettre le déplacement des personnes. Ces interactions se manifestent à différents niveaux:

1. **Intermodalité** : Au niveau d'un déplacement unique, l'intermodalité fait référence à l'utilisation de différents modes de transport pour compléter un trajet. Par exemple, un individu pourrait utiliser le métro pour une portion de son trajet puis continuer à vélo pour atteindre sa destination finale.
2. **Multimodalité** : Sur le plan individuel, la multimodalité décrit l'utilisation de différents modes de transport par une même personne mais pour des trajets distincts. Par exemple, un individu peut choisir de conduire pour visiter un ami, utiliser le vélo pour se rendre à l'université, et opter pour la marche pour aller à l'épicerie.

3. **Corrélations systémiques** : Au niveau du système, les interactions entre modes peuvent également être identifiées à travers des corrélations d'usage qui se manifestent selon des variations saisonnières ou quotidiennes. Par exemple, durant les mois d'été, on observe souvent une baisse de l'utilisation du métro au profit du vélo, illustrant une préférence pour des modes de transport plus agréables durant les périodes de beau temps.

2.2.2 Bassin d'attraction des stations de transport en commun

Le bassin d'attraction d'une station de métro correspond à la zone géographique d'où proviennent les usagers de la station. Ce bassin représente l'étendue spatiale dans laquelle les individus sont susceptibles d'accéder à la station par divers modes de transport tels que la marche, le vélo, la conduite ou l'utilisation de services de correspondance comme les bus (Andersen & Landex, 2009). La taille et la forme du bassin d'attraction dépendent de facteurs tels que l'accessibilité piétonne, les réseaux routiers, la disponibilité des transports publics, les schémas d'utilisation des terres et la distance que les gens sont prêts à parcourir pour atteindre la station.

Traditionnellement, les bassins d'attraction étaient définis à l'aide de surfaces circulaires simples basés sur des distances moyennes de marche allant typiquement de 500 à 800 mètres (Farber & Marino, 2017 ; Canepa, 2007 ; Sohn & Shim, 2010). Une approche plus rigoureuse utilise la distance du réseau, qui calcule la distance réelle à la station en utilisant le réseau routier et parfois même le réseau piétonnier. Un polygone est tracé pour inclure tous les segments du réseau accessibles dans une certaine distance de la station, rendant ainsi les zones d'attraction obtenues plus réalistes en tenant compte du contexte géographique et de la connectivité du réseau (Andersen & Landex, 2009 ; Chekir, 2023).

Des méthodes plus avancées prennent en compte l'environnement bâti environnant, les motifs de voyage des passagers et les modes de connexion pour produire des bassins d'attraction. Ces facteurs sont examinés à travers diverses méthodologies, telles que les modèles d'arbre de décision et les courbes de densité de probabilité (Dong et al., 2024; Wang et al., 2024).

2.2.3 Amélioration de la portée des transports en commun

L'utilisation du vélo pour accéder aux transports en commun permet d'étendre considérablement leur portée en couvrant des distances bien plus importantes que celles réalisables à pied. Le rayon moyen d'usage du vélo se situe entre 3 et 5 kilomètres pour un vélo classique et environ 10

kilomètres pour un vélo à assistance électrique (VAE), tandis que celui de la marche est limité à 300 mètres à 1 kilomètre. Ces différences font du vélo un levier crucial pour résoudre les défis associés au premier et au dernier kilomètre, particulièrement dans les zones où l'étalement urbain diminue l'accessibilité des transports en commun.

Selon diverses études, les cyclistes sont prêts à parcourir entre 800 mètres et plus de 2 kilomètres pour accéder à des arrêts de transport, en fonction de l'infrastructure disponible, des conditions environnementales et de leurs préférences personnelles. Une étude menée à La Haye a révélé que la distance médiane parcourue par les cyclistes pour rejoindre un arrêt de transport est d'environ 1 000 mètres, atteignant jusqu'à 2 000 mètres pour le 90^e percentile (Rijsman et al., 2019). Une étude dans la région métropolitaine de Rotterdam a montré que les usagers sont prêts à parcourir jusqu'à 6 kilomètres à vélo pour rejoindre une gare lorsqu'ils réalisent un trajet total de plus de 30 kilomètres. En revanche, pour des trajets plus courts, la distance à vélo diminue proportionnellement, illustrant que les comportements cyclistes sont également influencés par la distance totale du déplacement à effectuer (Givoni & Rietveld, 2007).

Dans d'autres contextes, comme Copenhague, les cyclistes rallongent leur trajet de 1,84 kilomètre pour bénéficier d'une voie cyclable dédiée et d'un kilomètre supplémentaire pour éviter des zones fortement congestionnées (Vedel et al., 2017). De manière similaire, dans des villes comme Philadelphie et San Francisco, la distance moyenne parcourue à vélo pour accéder aux stations de bus, métro et tramway est estimée à 4,2 kilomètres (Flamm et Rivasplata, 2014). Enfin, dans la région métropolitaine de Séoul et Daejeon en Corée, les distances parcourues à vélo varient entre 1,96 km et 2,13 km selon qu'il s'agisse de stations résidentielles ou de lieux d'emploi (Lee et al., 2016).

En améliorant la portée des transports en commun, l'intégration du vélo vise à résoudre les défis associés au premier et au dernier kilomètre. Cette synergie repose sur un réseau cyclable bien connecté et sécuritaire, offrant une connectivité efficace aux installations de transport en commun (Schlossberg et Brown, 2004). En intégrant le vélo comme mode d'accès, on soutient non seulement l'usage des transports publics, mais également l'équité dans les transports, en élargissant l'accessibilité pour des populations vivant dans des zones moins desservies (Zuo et al., 2020).

2.2.4 Potentiel latent

Malgré les alternatives de transport proposées depuis plusieurs années à Montréal, la dépendance à l'automobile reste importante (Laviolette et al., 2020). Le taux de motorisation a augmenté de 7% entre 2006 et 2016 sur l'Île de Montréal, surpassant la croissance démographique (Autorité régionale de transport métropolitain, 2018). Néanmoins, certaines initiatives montrent qu'une réduction de l'usage de l'auto solo est envisageable. Par exemple, la campagne Vélovolt a offert la possibilité à des employés d'organisations diverses de tester des vélos à assistance électrique (VAE) pendant trois semaines. Cette expérience a impliqué plus de 1000 participants sur deux années consécutives à travers le Québec. Les résultats sont prometteurs : à la suite de l'essai, les participants ont durablement modifié leurs habitudes de transport : 37 % des participants ont diminué leur usage de la voiture pour leurs déplacements quotidiens, 3 % ont complètement cessé d'utiliser ce mode de transport pour le navettage, 10 % ont augmenté leur utilisation des transports en commun, 18 % ont continué d'utiliser le VAE, 23 % ont préféré marcher et 24 % ont choisi le vélo standard (Chevalier, 2024). Ces résultats indiquent que la réduction de l'utilisation de l'auto solo pour le navettage est possible et ce, sans investissements financiers majeurs.

2.2.5 Demande induite

La demande induite est un phénomène par lequel l'augmentation de la capacité d'un système de transport, comme la construction de nouvelles routes ou l'ajout de voies, entraîne une augmentation du volume de circulation qui n'aurait peut-être pas existé autrement. Cette augmentation se produit car l'amélioration de l'infrastructure réduit le temps et le coût de déplacement, encourageant ainsi davantage de déplacements, ou permettant des déplacements qui n'auraient pas été réalisés sans ces améliorations. Par exemple, la construction de nouvelles autoroutes peut stimuler l'étalement urbain, conduisant à une plus grande dépendance à la voiture et donc à une augmentation de la demande de transport motorisé (Stigen et al., 2024).

Dans un contexte similaire, la création de voies cyclables structurantes attire également de nouveaux cyclistes. Le REV Saint-Denis à Montréal illustre bien ce phénomène. Entre 2018 et 2022, cet axe a été transformé pour intégrer un réseau de voies cyclables protégées. Suite à ces aménagements, une forte augmentation de l'achalandage a été constatée année après année. Par exemple, au croisement de Saint-Denis et Des Carrières, on a enregistré 1 126 000 passages en 2021, 1 320 000 en 2022 et 1 500 000 en 2023, selon les données d'Eco-Counter (<https://data.eco-counter.com/ParcPublic/?id=630#>).

Cependant, ces chiffres ne prouvent pas nécessairement une demande induite à l'échelle de la ville. Comme l'a montré une étude menée à Copenhague (Vedel et al., 2017), une part importante des usagers d'une nouvelle infrastructure peut être constituée de cyclistes existants attirés par un itinéraire plus sécuritaire ou agréable. Bien que le REV Saint-Denis témoigne d'un succès local, une analyse à plus grande échelle est essentielle pour distinguer entre augmentation nette du nombre de cyclistes et simple transfert d'achalandage.

2.3 Intermodalité : Intégration du vélo avec les transports en commun

L'intermodalité – la combinaison de différents modes de transport au sein d'un même trajet – peut prendre différentes formes. Cette section de la revue de littérature se concentre sur l'intégration du vélo avec les transports en commun, en explorant des concepts tels que "Bike and Ride", les systèmes de vélos partagés, le transport de vélos à bord des transports en commun et les facteurs influençant cette intégration.

2.3.1 Combinaison vélo et transport en commun

La première méthode consiste à rejoindre la station de transport en commun avec son vélo personnel, puis à le garer avant de poursuivre le trajet en transport collectif. Couramment appelée "bike and ride", cette approche est essentielle pour connecter la mobilité cycliste aux réseaux de transport en commun.

La présence de stationnements sécurisés pour vélos joue un rôle crucial dans ce processus. Offrir un stationnement sûr répond aux préoccupations liées au vol et au vandalisme, qui constituent des obstacles majeurs à l'utilisation du vélo. Des études montrent que la disponibilité de stationnements vélos sécurisés encourage davantage de personnes à utiliser le vélo, notamment pour les déplacements domicile-travail (Mead et al., 2016; Spierenburg et al., 2024). À Montréal, par exemple, une forte proportion de cyclistes, soit 43 % des répondants à une enquête, se disent prêts à payer au moins 0,50 \$ par jour pour la sécurité de leur vélo, illustrant que des stationnements sécurisés peuvent inciter à une augmentation de l'usage du vélo, particulièrement parmi ceux qui éviteraient autrement de faire du vélo en raison du risque de vol (van Lierop et al., 2014).

Au-delà des stationnements sécurisés, l'écosystème cyclable entourant les stations de transport en commun peut être enrichi pour soutenir efficacement cette pratique. Cela inclut des stationnements vélos suffisants, accessibles, couverts et en nombre adéquat, mais aussi des services

complémentaires tels que des systèmes de location de vélos, des stations de vélos partagés et des bornes de réparation équipées d'outils en libre-service. De plus, des points de vente de matériel vélo et un environnement général agréable autour des stations améliorent l'expérience globale et encouragent l'utilisation combinée du vélo et des transports en commun.

2.3.2 Systèmes de vélopartage

Une autre façon de se rendre à la station de transport en commun à vélo est d'utiliser un système de vélo en libre-service.

Les stations de vélopartage situées à proximité des stations de transport en commun sont souvent les plus utilisées du système. Par exemple, une étude réalisée à Shenzhen, en Chine, a révélé que les vélos partagés sont fréquemment utilisés comme mode de transfert vers les stations de métro, en particulier aux heures de pointe. La recherche montre que les stations adjacentes aux réseaux de transport en commun connaissent une utilisation plus élevée que celles situées ailleurs (Zhao et al., 2023). De manière similaire, une étude menée à Wuhan, en Chine, a confirmé que les stations proches des stations de métro enregistrent une augmentation de la fréquentation pendant les heures de déplacement (Liu, 2022). À Montréal on retrouve des tendances similaires d'après (Peize Li, 2018), une augmentation de 10 % de la fréquentation du métro est corrélée à une hausse de 4,16 % à 5,44 % de l'utilisation du système de vélopartage BIXI.

De la même façon que le vélo personnel, les systèmes de vélos en libre-service contribuent à améliorer l'accessibilité aux transports en commun en élargissant les bassins d'attraction des stations de métro. Ils jouent un rôle clé dans la résolution des problèmes du "premier" et "dernier kilomètre", ce qui permet d'accroître l'accès aux stations de transport en commun (Liu, 2022). Les recherches montrent que l'intégration des vélos partagés avec les transports publics permet d'élargir la zone d'attraction effective des stations de métro ou de bus, souvent jusqu'à 2 kilomètres, bien au-delà des zones piétonnes traditionnelles. Par exemple, une étude a révélé que les systèmes de vélos en libre-service sans station pouvaient pratiquement doubler la superficie des bassins d'attraction des stations de métro en milieu urbain, comparés aux zones desservies par la marche à pied (Yuan et al., 2024).

Le pourcentage de trajets effectués à vélo via des systèmes de partage est considérable et varie en fonction des villes et des systèmes en place. Par exemple, une étude portant sur le système de vélos en libre-service à Lisbonne a montré que les vélos partagés, qu'ils soient électriques ou

traditionnels, représentaient une part importante des trajets quotidiens (Raposo et al., 2022). À New York, le système Citi Bike a démontré son efficacité en prenant en charge une grande part des trajets de courte distance, en particulier pendant les heures de pointe (Xie et al., 2024).

Une différence notable de comportement existe entre les utilisateurs de vélos en libre-service et ceux qui possèdent un vélo personnel. Une étude menée à Washington, D.C. par Buck et Buehler (2013) a révélé que les utilisateurs des systèmes de vélos en libre-service sont souvent des personnes plus jeunes, plus susceptibles d'être des femmes, avec des revenus plus bas et moins susceptibles de posséder un vélo ou une voiture par rapport aux cyclistes traditionnels. De plus, ces utilisateurs ont tendance à effectuer des trajets plus utilitaires que récréatifs. Cela montre que les systèmes de vélopartage attirent un public différent et permettent aux municipalités d'encourager de nouveaux segments de la population à se tourner vers le vélo.

Il existe également des différences notables dans l'utilisation des vélos en libre-service selon le type d'utilisateur. Une étude menée à Washington, D.C. par Wergin et Buehler (2017), qui a analysé les déplacements des vélos en libre-service de la capitale à l'aide de données GPS, a révélé des variations importantes entre les utilisateurs à court terme et les membres à long terme. Les utilisateurs à court terme, souvent des touristes, ont tendance à effectuer des trajets plus longs et plus lents, principalement concentrés autour des zones touristiques comme le National Mall. Ils utilisent également davantage les infrastructures cyclables dédiées, par opposition aux membres à long terme, dont les trajets sont plus courts, concentrés dans des quartiers résidentiels à usage mixte et utilisent moins les voies cyclables. Ces derniers se déplacent plus souvent sur les routes partagées avec la circulation automobile.

2.3.3 Vélo à bord

Le dernier volet de l'intermodalité étudié concerne la possibilité de transporter son vélo dans le véhicule de transport en commun. Cette option permet aux usagers de disposer de leur vélo à la fois pour le trajet initial jusqu'au transport en commun, mais aussi pour la partie finale du trajet une fois arrivés à destination. Dans la majorité des cas, les vélos sont autorisés dans les véhicules sur rail, mais uniquement en dehors des heures de pointe. Aux heures de forte affluence, les systèmes de transport peuvent être saturés et l'introduction d'un vélo dans une rame risque de créer des tensions et d'encombrer l'espace. Par conséquent, autoriser les vélos en dehors des périodes de pointe sert principalement à accommoder les déplacements de loisirs ou ceux réalisés à des heures

moins achalandées. Une solution envisageable pour contourner ces restrictions est l'utilisation de vélos pliables, qui peuvent être transportés même aux heures de pointe en causant une gêne moins importante.

À Montréal les vélos sont autorisés dans les rames aux horaires suivants : de l'ouverture jusqu'à 7h, de 9h30 à 15h30, puis de 18h jusqu'à la fermeture du réseau pour les jours de semaine. Le week-end ainsi que les jours fériés, les vélos sont acceptés en tout temps. Cependant, malgré cette ouverture, les infrastructures facilitant l'accès des vélos dans les stations restent partielles. Parmi les 68 stations de métro que compte Montréal, seules 2 sont équipées de glissières à vélo, permettant d'éviter de les porter dans les escaliers, et 27 stations sont équipées d'ascenseurs. Pour les autobus, seulement 8 des 221 lignes disposent de bus équipés de racks à vélo à l'avant selon la STM.

2.3.4 Les facteurs qui bonifient cette intégration

Les études sur l'intégration du vélo avec les transports en commun identifient plusieurs facteurs qui bonifient cette intermodalité. Le premier élément essentiel est la qualité et l'étendue du réseau cyclable. Des infrastructures cyclables continues et sécurisées permettent d'attirer davantage de cyclistes vers les stations de transport en commun. Par exemple, à Washington, D.C., une étude a montré que l'ajout de 100 mètres de voies cyclables augmentait de 70 le nombre de trajets annuels entre une station de vélopartage et un arrêt de métro (Tushar & Buehler, 2024). En outre, l'absence de voies cyclables dans les zones à forte circulation motorisée décourage les cyclistes de parcourir de longues distances pour accéder aux stations de transport (Zuo, 2020). Une infrastructure adaptée est donc un levier puissant pour favoriser cette intégration.

Au-delà des infrastructures, l'environnement bâti joue également un rôle important. La densité d'emploi et de population dans les zones proches des stations de transport en commun est un facteur déterminant pour la part modale des modes actifs, tels que le vélo. Les études montrent que les zones à forte densité résidentielle et les pôles d'emploi concentrés autour des stations augmentent l'utilisation des transports en commun et réduisent la dépendance à la voiture (Abdollahpour, 2024). Par ailleurs, un équilibre entre l'emploi et le logement dans les zones desservies par les stations favorise aussi le recours à des modes de transport actifs et à l'intermodalité.

Enfin, les caractéristiques socio-démographiques, telles que le revenu et le taux de pauvreté, influencent également l'intégration du vélo avec les transports en commun. Par exemple, une

hausse de 1 % du taux de pauvreté dans un quartier est associée à une baisse de 52 trajets annuels en vélopartage vers les stations de métro à Washington, D.C. (Tushar & Buehler, 2024). Ces résultats montrent que pour maximiser les bénéfices de l'intégration vélo-transports en commun, il est crucial de prendre en compte l'ensemble des facteurs environnementaux, sociaux et infrastructurels.

2.3.4.1 La sécurité cyclable

La sécurité, tant réelle que perçue, est le facteur déterminant dans le choix des itinéraires cyclables, comme l'indiquent de nombreuses études. Pucher et Buehler (2017) ont démontré que la présence de voies cyclables protégées est essentielle pour réduire les interactions avec les véhicules motorisés et les risques d'accidents, ce qui encourage davantage de cyclistes, en particulier les moins expérimentés ou ceux accompagnés d'enfants. Cette observation est renforcée par Dill et McNeil (2012), qui soulignent que les cyclistes préfèrent les trajets où ils sont éloignés des véhicules motorisés, notamment en milieu urbain. L'aménagement des infrastructures joue un rôle clé dans cette perception de sécurité : des voies cyclables larges et bien entretenues, ainsi que des intersections sécurisées, favorisent l'utilisation du vélo (Tilahun et al., 2007). De plus, Sanders (2015) montre que la sécurité perçue influence fortement les décisions des cyclistes, qui préfèrent souvent emprunter des routes jugées plus sûres, même si elles sont plus longues. Ainsi, des infrastructures continues, une signalisation claire et des pistes protégées sont essentielles pour réduire le stress des cyclistes et encourager l'usage du vélo.

Un sondage réalisé en 2022 par la firme Léger auprès de 1028 résidents de la ville de Québec confirme l'importance de la sécurité perçue dans le choix des infrastructures cyclables. Selon les résultats, les aménagements les mieux évalués par les citoyens sont majoritairement des pistes cyclables bidirectionnelles. À l'inverse, les rues sans infrastructures cyclables se retrouvent en bas de classement, démontrant que les cyclistes sont moins à l'aise sur ces trajets. Le sondage révèle également des disparités démographiques : les femmes et les personnes de 55 ans et plus se sentent moins en sécurité sur plusieurs des aménagements évalués, et les citoyens sont moins enclins à laisser un enfant circuler sur ces infrastructures, avec un écart d'au moins dix points de pourcentage par rapport à leur propre niveau de confort. Ces résultats soulignent l'importance d'aménagements dédiés pour assurer le confort et la sécurité des cyclistes, en particulier pour les populations les plus vulnérables.

Plusieurs indicateurs ont été développés pour évaluer le confort et le niveau de stress des itinéraires cyclables. Par exemple, le « Level of Traffic Stress » classe les routes en quatre niveaux, du LTS 1, adapté à tous les cyclistes avec des pistes protégées et des zones à faible vitesse, au LTS 4, réservé aux cyclistes expérimentés, sur des routes à forte circulation sans infrastructures dédiées. De façon similaire, le « CAN-BICS » (Canadian Bikeway Comfort and Safety metrics) prend en compte la connectivité du réseau, la sécurité des intersections et l'aménagement urbain pour évaluer le stress tout au long d'un parcours. Ces indicateurs permettent ainsi de classer les segments routiers selon différents niveaux de stress, facilitant l'aménagement de réseaux cyclables plus sécurisés.

2.4 Cohabitation entre les modes

La cohabitation entre les différents modes de transport, en particulier entre les vélos et les transports en commun, est un enjeu crucial pour l'aménagement urbain. Elle désigne l'ensemble des interactions de ces modes dans l'espace urbain, sans que ceux-ci ne soient utilisés ensemble pour un même trajet. Ce chapitre explore les dynamiques d'espaces partagés, où ces deux modes se retrouvent souvent en concurrence pour l'allocation d'espace. Par exemple lorsque l'on décide d'attribuer plus de place aux modes durables, des voies réservées peuvent être attribuées aux transports en commun, les cyclistes se retrouvent parfois exclus ou en danger, ce qui peut entraîner une compétition directe entre ces deux modes. Cette situation soulève un problème fondamental : bien que ces deux modes soient essentiels à la mobilité durable en ville, ils se retrouvent en opposition dans la répartition de l'espace public. L'objectif de cette section est de mettre en lumière ces problèmes et de proposer des solutions pour une cohabitation harmonieuse entre les cyclistes et les usagers des transports en commun, en prônant une répartition plus équilibrée de l'espace, au bénéfice des deux modes.

2.4.1 Partage de l'espace

La rue est un espace multifonctionnel, à la fois lieu de circulation des personnes et des marchandises, mais aussi espace d'activités sociales et économiques. Elle joue un rôle essentiel en tant que lien permettant la mobilité, mais aussi comme un lieu d'interaction, d'échange et de vie (Lefebvre-Ropars, 2021). En plus de ces fonctions principales, la rue abrite des réseaux d'infrastructures urbaines, remplit des fonctions environnementales et structure l'aménagement du cadre bâti. Chaque dimension de la rue correspond à des usages variés qui évoluent selon la période

de la journée, la semaine ou l'année, impliquant différents usagers et pratiques (Fleury, 2004; Hui et al., 2018). Le partage de cet espace repose sur des décisions politiques, administratives et techniques, qui cherchent à équilibrer les besoins des différents modes de transport, selon des principes d'équité, qu'ils soient implicites ou explicites (Jones et al., 2008; Rodriguez-Valencia, 2015).

Le partage de l'espace public, en théorie destiné à tous, est en pratique largement dominé par la voiture, qui consomme beaucoup plus d'espace que les autres modes de transport. Un automobiliste occupe en moyenne l'équivalent de l'espace de vingt personnes se déplaçant dans un véhicule de transport en commun. En mouvement, une voiture consomme environ 1,39 m² par heure et par personne, contre seulement 0,52 m² pour un cycliste, 0,27 m² pour un piéton, et 0,07 m² pour un passager de bus (Crist et al., 2022; Hérán et Ravalet, 2008). Ces estimations varient selon la taille, la vitesse et le nombre de passagers des véhicules et ne prennent même pas en compte l'espace occupé par le stationnement.

Dans la plupart des villes nord-américaines, entre 70 et 80 % de l'espace public de la rue est alloué aux voitures, sous forme de voies de circulation ou de stationnement. Par exemple, des études menées à New York et à Los Angeles montrent que seulement 20 à 30 % de l'espace de la rue est dédié aux piétons, aux cyclistes et aux transports en commun combinés (Attard et al., 2023). À Montréal, d'après Lefebvre-Ropars (2021), les voitures occupent plus de 75 % de l'espace, contre près de 20 % pour les piétons et moins de 2 % pour les cyclistes et les usagers des transports collectifs.

En revanche, dans des villes plus favorables aux modes actifs, comme Copenhague ou Amsterdam, une plus grande part de l'espace public est dédiée aux cyclistes et aux piétons. Dans ces villes, jusqu'à 30 à 40 % de l'espace des rues est alloué aux pistes cyclables et aux chemins piétonniers (Pucher & Buehler, 2017). En ce qui concerne les transports en commun, l'espace qui leur est dédié, comme les voies réservées aux bus, représente généralement une faible proportion de l'espace public, souvent moins de 10 %, sauf dans les villes où des initiatives spécifiques, telles que les systèmes de bus à haut niveau de service (BRT), sont mises en place, ce qui peut augmenter considérablement cette part (Zheng & Geroliminis, 2013).

On peut supposer que les cyclistes, tout comme les transports en commun, peuvent bénéficier d'espaces dédiés sans que cela soit toujours nécessaire. Dans certaines rues à faible vitesse et à

faible débit de circulation automobile, le partage de la chaussée entre cyclistes et véhicules motorisés pourrait être suffisant et efficace. En revanche, l'allocation d'espaces dédiés aux cyclistes semble devenir essentielle lorsque les conditions de circulation rendent le partage dangereux ou inconfortable : présence importante de véhicules lourds, vitesse excessive des véhicules, ou densité élevée de trafic motorisé. Ces hypothèses soulignent la nécessité de recherches plus approfondies pour évaluer les perceptions des usagers et identifier les situations où des infrastructures spécifiques sont réellement nécessaires pour assurer une cohabitation sécuritaire et harmonieuse entre les différents modes de transport.

2.4.2 Conflits

Un conflit entre deux modes de transport peut survenir lorsque les déplacements d'usagers de différents modes (comme les voitures, vélos, bus et piétons) interfèrent les uns avec les autres, entraînant une modification de la trajectoire, de l'inconfort ou des risques pour la sécurité. Ces conflits surviennent généralement lorsque les trajets des différents modes se croisent ou se superposent, souvent aux intersections, passages piétons, arrêts de bus ou sur des voies partagées où plusieurs modes se partagent l'espace. Selon les recherches de Parker et Zegeer (1989) ainsi que l'Université de Lund (2005), deux types d'événements peuvent être observés : les interactions, où les usagers doivent ajuster leur comportement pour éviter de se gêner, et les conflits, qui nécessitent des manœuvres d'évitement rapides pour prévenir une collision, représentant ainsi un sous-ensemble des interactions.

Les études sur les conflits entre différents modes de transport, en particulier entre les usagers vulnérables tels que les cyclistes et les piétons, soulignent que ces conflits surviennent fréquemment aux intersections et sont fortement influencés par la conception des infrastructures. Une étude menée par Rahman et al. (2019) montre que les intersections sont des points critiques où les interactions entre cyclistes, piétons et véhicules motorisés sont particulièrement dangereuses en raison de la conception parfois inadéquate des infrastructures.

Dans le cadre d'une étude menée à Montréal, Saunier et Rabion (2013) ont observé que les piétons sont principalement menacés par les véhicules motorisés, tandis que les interactions entre piétons et cyclistes semblent plus naturelles et moins risquées. Bien que cette étude soit limitée en termes de sites et d'observations, elle suggère que les conflits entre piétons et cyclistes sont moins fréquents qu'avec les véhicules motorisés.

Cependant, Jarry et Apparicio (2021) constatent à Montréal que si les pistes cyclables hors chaussée réduisent effectivement les conflits entre les cyclistes et les véhicules motorisés, elles augmentent en revanche la probabilité de conflits avec les piétons.

Une autre étude réalisée par Buch et Jensen (2017) au Danemark met en évidence un conflit fréquent aux intersections signalées entre les cyclistes allant tout droit et les véhicules tournant à droite. Ce type de conflit est particulièrement prononcé lorsque cyclistes et véhicules arrivent en même temps à l'intersection et il est souvent aggravé par des comportements à risque des cyclistes, comme le passage au feu jaune ou à des vitesses élevées.

2.4.3 Conflits bus / vélos

Les bus et les vélos se situent aux extrémités opposées sur les spectres de la taille, de la masse et de la manœuvrabilité des véhicules, mais ils partagent souvent le même espace de circulation, en particulier sur les voies partagées et aux intersections. Bien que les deux modes de transport soient des alternatives efficaces à la voiture privée dans les zones urbaines, et largement promus à ce titre, ils peuvent également entrer en conflit lorsqu'ils cohabitent dans les mêmes espaces. Dans une perspective de promotion des modes de transport durables, il semble donc raisonnable de ne privilégier aucun de ces modes au détriment des autres. Cette revue de littérature présente les résultats de différentes études afin d'identifier les moyens de renforcer les synergies entre les bus et les vélos tout en minimisant les conflits au sein du réseau routier.

Choisir de faire cohabiter les vélos avec les bus dans une voie partagée repose sur plusieurs avantages pratiques et économiques. Tout d'abord, la création de voies partagées bus-vélo s'avère souvent plus économique que de construire des infrastructures séparées pour chaque mode de transport. Ce type de solution nécessite moins de construction et d'entretien qu'une voie exclusivement réservée aux vélos et une autre aux bus, permettant ainsi aux villes d'améliorer les infrastructures de transport sans nécessiter des investissements excessifs ni empiéter de manière significative sur l'espace alloué aux voitures.

Cependant, des débats persistent quant aux avantages réels de cette solution. L'un des bénéfices des voies partagées est l'amélioration de l'efficacité des transports en commun, car les bus peuvent circuler hors de la circulation automobile. Toutefois, les résultats des études concernant l'efficacité varient en fonction des pays, de la configuration des routes, de la méthodologie et des flux de circulation. Plusieurs études montrent que la présence de vélos peut entraîner des retards pour les

bus, surtout lorsque le volume de cyclistes est élevé. À faible densité, l'impact des vélos sur les retards est minime, mais à un volume élevé, les retards peuvent devenir significativement plus importants (Alfred et al., 2019; Akter et Aziz, 2023). Une autre étude menée par Figliozzi et al. (2019) a montré que le chevauchement des infrastructures bus et vélo entraîne de nombreux conflits, principalement aux heures de pointe.

L'un des principaux points de discussion concernant les voies partagées est la question de la sécurité. Certaines études suggèrent que, bien que ces voies soient plus sûres pour les cyclistes que de circuler dans la circulation générale, elles restent néanmoins dangereuses. Par exemple, une étude menée par Mateus Martins Cavalcante de Macedo (2018) a révélé que les cyclistes dans une voie partagée avec des bus ont une expérience plus sécurisée qu'en circulant dans une voie générale. Les cyclistes dans ces voies n'ont à se préoccuper que des bus, ce qui réduit le nombre total de conflits. Cependant, l'étude a également montré que le nombre de conflits graves était plus important dans les voies partagées avec les bus que dans les voies générales, indiquant que ce type d'infrastructure n'est pas sans risques. De plus, les observations menées lors de cette étude montrent qu'un nombre significatif de cyclistes ont préféré utiliser le trottoir plutôt que la voie partagée, ce qui met en lumière des préoccupations persistantes en matière de sécurité.

Sur les rues partagées entre les vélos et les bus, plusieurs zones clés présentent des dangers et des conflits susceptibles de survenir. Les différences de vitesse, de taille et de maniabilité entre les bus et les vélos créent des risques spécifiques le long de la route. Voici les principaux points de friction :

1. Arrêts de bus : Le danger le plus fréquent sur les rues partagées se situe près des arrêts de bus. Lorsque les bus s'arrêtent pour prendre ou déposer des passagers, leur trajectoire croise celle des cyclistes, les forçant à s'arrêter ou à contourner le bus (Figliozzi et al., 2019). Cela augmente le risque de collision, surtout si les cyclistes ou les chauffeurs de bus ne sont pas conscients des mouvements de l'autre. Il se peut que les cyclistes n'aient pas assez d'espace pour passer en toute sécurité ou qu'ils se trouvent dans l'angle mort du conducteur lorsque le bus se dirige vers le trottoir.

2. Intersections : Les intersections représentent toujours des zones à haut risque pour tous les modes de transport, mais le danger est amplifié lorsque les bus et les vélos partagent la route. Les bus qui tournent à droite ou à gauche peuvent poser un risque significatif aux cyclistes. Les cyclistes sont souvent mal vus par les conducteurs de bus, augmentant ainsi les risques de collision latérale ou de conflits lors des virages.

3. Voies étroites : Lorsque l'espace est limité sur la voie, les cyclistes peuvent être contraints de rouler très près du bus, ce qui peut conduire à des situations de dépassement dangereuses. Les bus peuvent tenter de dépasser les cyclistes sans laisser suffisamment de distance, ce qui peut entraîner des accidents ou forcer les cyclistes à quitter la route.

4. Zones congestionnées : Dans les zones urbaines très fréquentées, les bus s'arrêtent fréquemment, accélèrent et décélèrent, tandis que les cyclistes tentent de maintenir une allure régulière. Cette dynamique d'arrêt-départ entraîne des interactions fréquentes où les cyclistes doivent réagir rapidement aux mouvements des bus, augmentant ainsi le risque de collisions. Les cyclistes peuvent ne pas avoir assez de temps ou d'espace pour réagir aux arrêts brusques des bus et la fréquence des arrêts accroît les interactions entre les deux modes.

Une solution potentielle est illustrée dans la Figure 2.2 pour réduire les conflits entre les bus et les cyclistes aux arrêts de bus ; elle consiste à séparer les flux des cyclistes avec les véhicules motorisés, en redirigeant les pistes cyclables derrière les arrêts, et en implémentant un quai d'embarquement qui permet l'embarquement et le débarquement des passagers. Les passagers peuvent attendre l'autobus sur le quai ou sur le trottoir. Cette méthode permet d'éliminer les conflits directs entre les bus et les vélos, comme l'ont observé Zhao et al. (2014). En séparant physiquement les trajectoires des bus et des cyclistes, on améliore à la fois la sécurité et l'efficacité de ces deux modes de transport. Bien que cette solution réduise les conflits entre les bus et les cyclistes, elle déplace le problème vers les interactions entre cyclistes et piétons, surtout lorsque les cyclistes sont redirigés sur les trottoirs, comme l'ont noté Figliozzi et al. (2019), mais ces interactions comportent moins de risque d'accident grave que les interactions entre les cyclistes et les bus. Cela soulève des questions sur la conception optimale de ces infrastructures, qui doit équilibrer les coûts, l'espace disponible et la sécurité pour tous les usagers. Cependant, cette configuration nécessite une large emprise au sol, ce qui peut rendre sa mise en place coûteuse et complexe sur des voies plus étroites.

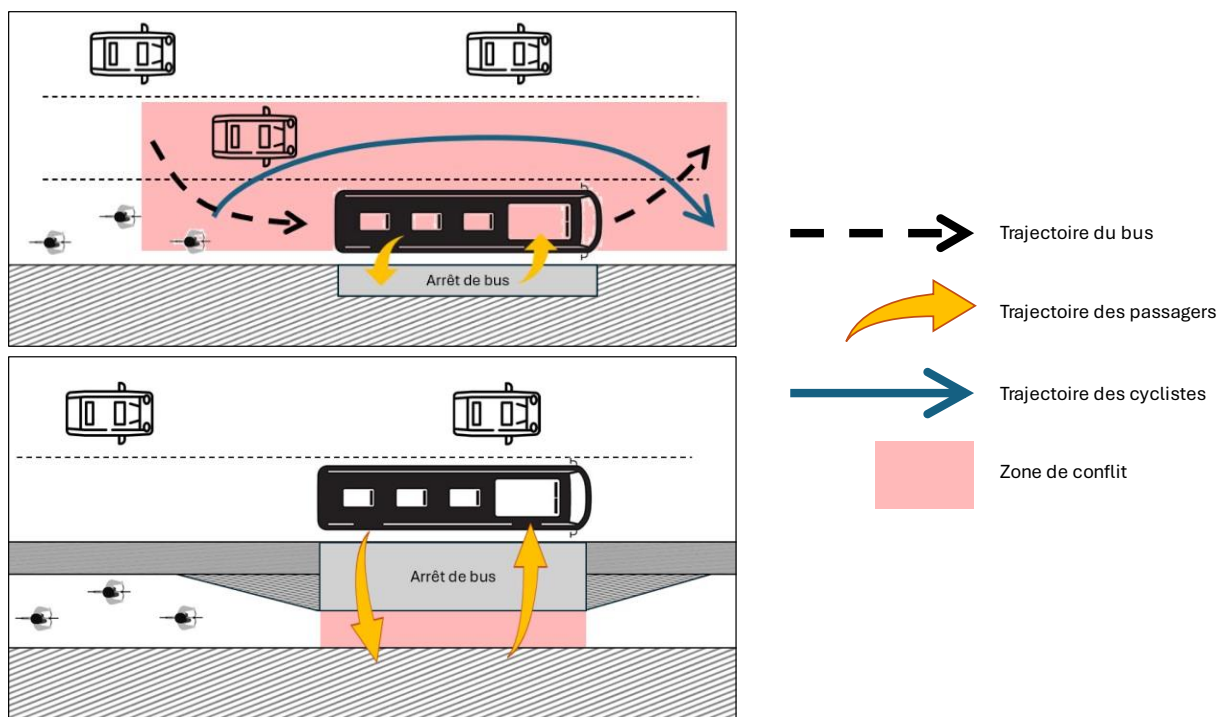


Figure 2.2 Différentes configurations d'arrêt d'autobus : voie partagée bus/vélo (en haut) piste cyclable séparée et îlot d'embarquement (en bas)

Les plates-formes surélevées aux arrêts de bus représentent une solution intermédiaire entre les voies partagées bus-vélo et les pistes cyclables passant derrière les arrêts de bus. Elles jouent un rôle crucial en améliorant la sécurité des interactions entre les cyclistes et les passagers tout en facilitant l'accès aux bus, notamment pour les personnes à mobilité réduite. Ces plateformes ont été étudiées pour leur impact sur la sécurité des usagers vulnérables. Par exemple, des recherches menées par Makwasha et Turner (2017) montrent que les passages surélevés peuvent réduire les accidents graves jusqu'à 63 %. L'étude de Cheng Zhang et al. (2022) souligne que ce type d'aménagement réduit la gravité des conflits entre les passagers et les cyclistes. Cependant, une densité élevée de cyclistes et de passagers aggrave les risques de sécurité, en particulier lorsque les piétons traversent la piste cyclable de manière imprévisible ou longent celle-ci. Ainsi, l'étude suggère que la conception des arrêts de bus devrait inclure une visibilité claire pour les passagers traversant et les cyclistes circulant, afin de minimiser les risques de conflits. Il est également recommandé de prévoir suffisamment d'espace pour les passagers en attente et de bien concevoir les passages pour piétons. Ces passages doivent guider les passagers à traverser la piste cyclable de manière sécurisée, tout en protégeant à la fois les cyclistes et les piétons.

Montréal implémente ce type d'aménagement en bordure de ses voies cyclables et les exigences en matière d'accessibilité universelle ont récemment augmenté. Un exemple de schéma issue d'un guide de bonne pratique de la ville est présenté dans la Figure 2.3. Une telle configuration contribue non seulement à améliorer la sécurité, mais aussi à rendre le transport en commun plus accessible aux personnes à mobilité réduite, tout en facilitant la cohabitation des cyclistes et des utilisateurs des transports publics.

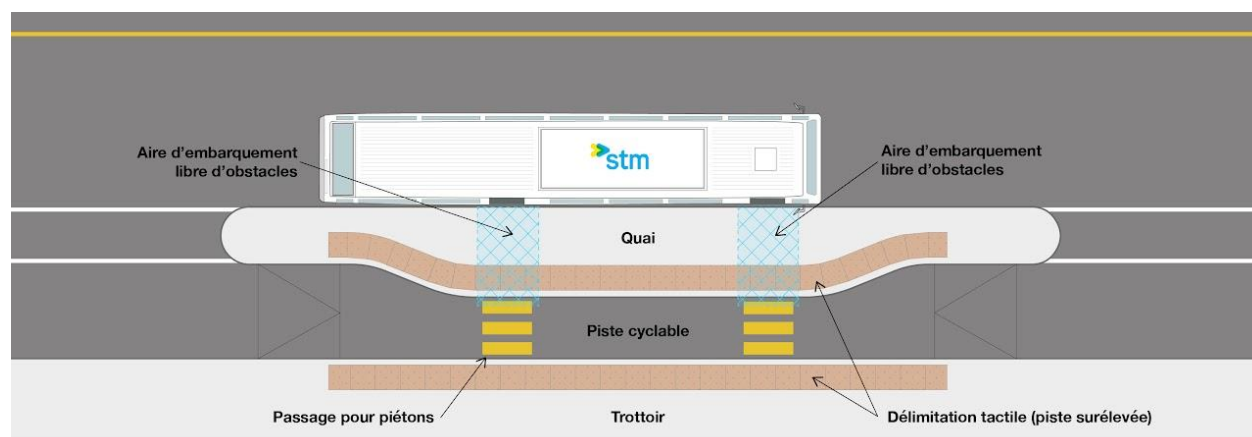


Figure 2.3 Schéma d'un arrêt d'autobus en bordure d'une voie cyclable (Ville de Montréal)

2.5 Complémentarité d'usage

À l'échelle d'un trajet individuel, les différents modes peuvent parfois entrer en concurrence : choisir de réaliser un trajet en auto par exemple, implique qu'il ne se fera pas avec un autre mode. En Amérique du Nord, où l'espace dédié à l'automobile est prédominant, la nécessité de promouvoir des modes de déplacement plus durables, comme le vélo et le transport en commun, est évidente. Cependant, la relation entre ces deux modes est complexe : ils peuvent être perçus à la fois comme complémentaires et compétitifs. Cette partie explore les différentes dynamiques d'usage, en abordant leurs interactions en termes de partage de ressources et d'espace, ainsi que leurs complémentarités ou compétitivités potentielles.

2.5.1 Variabilité temporelle d'usage

Au fil de l'année et selon les conditions météorologiques, la répartition des parts modales évolue. À titre d'exemple, à Montréal en 2020, seulement 13 % des cyclistes continuaient à se rendre au travail à vélo durant l'hiver (Vélo Québec, 2020a). Dans son étude, Lepage (2019) analyse les modèles d'utilisation des différents modes de transport afin de mieux comprendre les variations

annuelles, hebdomadaires et journalières à Montréal. Les fluctuations du choix modal des individus sont influencées par plusieurs facteurs, le principal étant les conditions météorologiques.

2.5.1.1 Météo

Les conditions météorologiques ont un impact variable sur les différents modes de transport, mais selon Sabir (2011), elles affectent peu le nombre total de déplacements. En s'appuyant sur l'enquête néerlandaise sur les déplacements de la population, cette étude montre que les variations climatiques entraînent principalement un transfert modal entre les options de transport sans modifier significativement le volume global de déplacements. Par exemple, les précipitations provoquent un basculement du vélo vers le transport en commun et la voiture, tandis que des températures élevées, au-delà de 25°C, augmentent l'utilisation du vélo de 22% et réduisent l'usage de la voiture et des transports en commun de 15% et 20% respectivement. De manière notable, Sabir identifie que les températures très élevées sont la seule condition météorologique ayant un impact considérable sur la demande de déplacements, entraînant une réduction d'environ 5% du nombre total de déplacements. Une étude réalisée dans la région du Grand Londres par Tsapakis et al. (2013) corrobore ces observations et indique que des conditions météorologiques modérées, comme une pluie légère ou des températures douces, ont un effet limité mais notable sur le nombre total de voyages. Ils notent que la pluie légère et modérée peut augmenter les temps de trajet de 0,1 à 3,8%, mais l'impact sur le nombre de déplacements est moins prononcé par rapport à la forte pluie ou à la neige. De plus, Galich et Nieland (2023) observent que les usagers multimodaux sont particulièrement sensibles aux conditions météorologiques défavorables, optant souvent pour la voiture lorsqu'il fait mauvais temps, ce qui suggère que les modes de transport durable sont plus affectés par les variations climatiques que la voiture.

Le vélo est le mode de transport le plus affecté par les conditions météorologiques (Brandenburg et al., 2007; Sabir, 2011). Les études montrent que l'usage du vélo diminue généralement en présence de précipitations et augmente avec la température, bien que cette relation soit non linéaire, notamment lorsqu'il fait extrêmement chaud ou froid (Miranda-Moreno et Nosal, 2011; Niemeier, 1996; Thomas et al., 2009; Lepage, 2019). Par exemple, à Montréal, lorsque la température dépasse 28°C, l'utilisation du vélo diminue significativement (Miranda-Moreno et Nosal, 2011 ; Lepage, 2019). L'étude réalisée par Lepage en 2019 révèle que la diminution de l'usage des vélos Bixi à Montréal en réaction aux précipitations est influencée par la localisation des stations. Il apparaît

que les stations situées au centre-ville enregistrent une baisse de leur fréquentation d'environ 6% pour chaque heure de pluie. En comparaison, les stations périphériques montrent une réduction plus marquée, de l'ordre de 7,5%. Cette différence pourrait s'expliquer par la brièveté des trajets effectués près du centre-ville, rendant les cyclistes moins sensibles aux intempéries. Par ailleurs, la station Champ-de-Mars présente une particularité avec une variation d'intensité moindre, soit de 7,7%, comparativement aux autres stations avoisinantes. Cette spécificité peut être attribuée à l'utilisation récréative significative de cette station, stimulée par la proximité de plusieurs attractions touristiques. L'humidité élevée et les vents forts ont également un impact négatif, bien que les effets du vent soient moins consistants à travers les études (Sabir, 2011; Miranda-Moreno, 2011). Une étude réalisée par Otim et al. (2022) observe que des températures supérieures à 25°C entraînent une réduction de 21% de l'utilisation des vélos en libre-service, tandis que la marche augmente de 27%, reflétant une préférence pour la marche par rapport au vélo dans des conditions chaudes.

Vanky et al. (2017) indiquent que l'activité piétonnière augmente avec des températures modérées et un léger couvert nuageux, en particulier pour les déplacements non essentiels durant les weekends, ce qui suggère que le climat modéré encourage les activités de plein air.

Le transport en commun, notamment les modes sur rail, semble généralement moins sensible aux conditions météorologiques comparé aux modes actifs. Des études indiquent que la demande utilitaire pour les transports en commun n'est pas significativement affectée par la météo, en revanche, les déplacements récréatifs peuvent l'être (Sabir, 2011). Par exemple, à New York, les conditions météorologiques défavorables comme la pluie, le vent et les températures extrêmes entraînent une réduction de la demande pour le métro, bien que cette baisse varie selon l'emplacement de la station et la météo spécifique (Singhal et al., 2014). Dans des études menées aux Pays-Bas et à Chicago, il apparaît que la demande pour les transports en commun diminue légèrement avec l'augmentation de la température, sauf lorsqu'il fait très froid, où la demande chute davantage (Sabir, 2011; Guo et al., 2007). Au contraire, dans le comté de Pierce (États-Unis), l'usage du bus diminue uniquement en hiver, possiblement en raison du confort réduit lors de l'attente en extérieur (Stover & McCormack, 2012). De plus, des précipitations peuvent entraîner une réduction d'environ 3% de l'usage des transports en commun, alors que d'autres études notent une légère augmentation (Syed & Bunker, 2015; Sabir, 2011). Concernant l'impact du vent et de

la neige, ils semblent diminuer l'utilisation des bus et du métro, avec une baisse estimée à 11% pour le bus en conditions de neige (Stover & McCormack, 2012; Guo et al., 2007).

L'utilisation de la voiture est également influencée par les conditions météorologiques, comme le montre Sabir (2011), en rapportant une augmentation de l'utilisation de la voiture pendant les précipitations, suggérant un report modal depuis des transports moins protecteurs comme les vélos ou les transports en commun. En revanche en Belgique, des études ont montré que la circulation routière tend à diminuer lorsqu'il y a des précipitations plus extrêmes telles que la pluie ou la neige, ainsi que lors de forts vents (Cools et al., 2010). Hogema (1996) note que, bien que la pluie légère ait un impact négligeable sur les volumes de circulation totaux, elle peut induire une conduite plus prudente, réduisant ainsi les vitesses moyennes et les espacements entre les véhicules.

2.5.1.2 Cyclisme hivernal

La réduction des volumes de cyclisme en hiver est bien documentée, notamment dans les régions confrontées à des conditions climatiques rigoureuses, mais aussi dans des pays plus tempérés comme l'Allemagne (Bergstrom & Magnusson, 2003 ; Blomqvist & Niska, 2018 ; Dahl Fenre & Klein-Paste, 2021). Une étude menée à l'Université de Toronto (Canada) révèle qu'en comparaison avec les saisons plus clémentes, seulement 27% des cyclistes continuent leur activité en hiver. Les facteurs tels que le genre et la possession d'abonnements de transport influencent cette tendance. Dans une université de Toronto, les étudiants sont plus enclins à continuer le vélo durant l'hiver comparativement au personnel académique (Nahal & Mitra, 2018).

Les conditions météorologiques difficiles, notamment les températures basses et les précipitations, ainsi que la sécurité subjective et objective réduite, sont des facteurs dissuasifs majeurs (Bergstrom & Magnusson, 2003 ; Dahl Fenre & Klein-Paste, 2021 ; Winters et al., 2010 ; Amiri & Sadeghpour, 2015 ; Chapman & Larsson, 2021). Cependant, l'impact de la température sur le cyclisme hivernal reste un sujet de débat : certaines recherches indiquent que le froid représente un obstacle, tandis que d'autres suggèrent que la température a peu d'effet sur cette pratique (Amiri & Sadeghpour, 2015; Ebrahimabadi, 2015).

L'entretien hivernal des voies cyclables s'avère cruciale pour maintenir l'activité cycliste durant cette saison. Des études nordiques montrent que des routes régulièrement déneigées et un entretien adéquat des pistes cyclables, sont essentiels pour réduire les accidents et augmenter la sécurité

(Alguren & Rizzi, 2022; Vingaard Olesen et al., 2021 ; Blomqvist & Niska, 2018 ; Miranda-Moreno et al., 2013).

À Montréal, la croissance du cyclisme hivernal est particulièrement notable, avec un taux de rétention des cyclistes en hiver qui a augmenté, passant de 6% en 2009 à 13%. L'augmentation des cyclistes durant les mois d'hiver entre 2011 et 2019 dans le quartier du Plateau-Mont-Royal est impressionnante, enregistrant une hausse de 415% (Eco Counter, 2021).

Les études soulignent l'importance d'une infrastructure cyclable de qualité et d'un entretien adéquat pour rendre le cyclisme hivernal attrayant et sécuritaire. Les résultats de ces études mettent en lumière le besoin de considérer le cyclisme en hiver comme une activité spécifique nécessitant des politiques et des aménagements adaptés pour en encourager la pratique continue, même dans les communautés à climat froid (Chapman & Larsson, 2021). Cependant, il existe un manque dans la littérature pour déterminer si certains cyclistes basculent vers l'intermodalité vélo-transport en commun durant l'hiver, ainsi que pour évaluer si le taux de rétention des cyclistes hivernaux est comparable à celui des adeptes de cette combinaison intermodale.

2.5.2 Complémentarité vs compétitivité

Lepage (2019) montre certaines relations de complémentarité et de compétitivité entre différents modes à Montréal. Par exemple, il semble y avoir une relation de compétitivité entre le vélopartage et les autres modes, étant donné que la période d'usage maximale du vélopartage (durant l'été) correspond à une période de plus faible usage pour les autres modes. D'autre part, il semble y avoir une relation de complémentarité entre le métro et le bus, étant donné que l'usage du bus augmente de façon importante lors de la période de fermeture du métro (durant la nuit).

Tushar et Buehler (2024) montrent qu'il existe une contradiction apparente entre le vélo en libre-service comme mode de transport concurrent et complémentaire à l'usage du transport en commun. En effet, certaines études menées à Washington, D.C. ont révélé que les stations de vélos en libre-service situées près des stations de métro dans le centre-ville ont tendance à diminuer la fréquentation du métro, tandis que ces mêmes stations augmentent la fréquentation du métro dans les zones péri-urbaines (Knaap & Ma, 2019). D'autres recherches montrent que le métro joue un rôle important comme point de départ et d'arrivée des trajets en vélopartage, entraînant une augmentation de la fréquentation quotidienne moyenne. Par exemple, une étude a démontré qu'une augmentation de 10 % des trajets en vélopartage à proximité des stations de métro pourrait accroître

la fréquentation du métro de 2,8 % (Ma et al., 2019). De plus, il a été constaté que 83 % des utilisateurs du vélopartage qui commencent ou terminent leur trajet près d'une station de métro utilisent également le métro, soulignant ainsi l'importance du vélopartage comme mode d'accès ou de sortie du réseau de transport en commun (Cheng et al., 2023). Bien que ces deux modes puissent parfois sembler en compétition, l'enjeu consiste à comprendre s'ils forment un écosystème de transport efficace, capable de réduire l'usage de l'automobile en offrant différentes alternatives viables pour chaque trajet et motif de déplacement.

2.5.3 Multimodalité

La multimodalité, c'est-à-dire l'utilisation de plusieurs modes de transport sur une période donnée, est de plus en plus reconnue comme un mécanisme clé pour réduire la dépendance à l'automobile en incitant les individus à opter pour la marche, le vélo ou les transports en commun (Chlond 2011; Kuhnimhof et al. 2012). Buehler et Hamre (2016) montrent avec des analyses des déplacements aux États-Unis que bien que la part des trajets à pied, à vélo ou en transport en commun puisse sembler faible lorsqu'on se base sur des statistiques de déplacements individuels ou du mode de transport principal pour le trajet domicile-travail, cette approche ne reflète pas la variabilité des comportements de mobilité au cours de la semaine. Par exemple, une analyse de données datant de 2001 et 2009 montre qu'environ 14 % des utilisateurs de voitures effectuent au moins deux trajets à pied, à vélo ou en transport en commun au cours d'une journée typique. De plus, environ 25 % des automobilistes réalisent au moins sept trajets hebdomadaires avec d'autres modes que la voiture.

Une autre étude de Buehler et Hamre (2014) souligne qu'au cours d'une semaine, la majorité des Américains—près de deux tiers—utilisent la voiture tout en effectuant au moins un déplacement à pied, à vélo ou en transport en commun. Environ un quart des automobilistes effectue au moins sept trajets hebdomadaires en dehors de la voiture. Ces résultats suggèrent qu'il existe un continuum des types de mobilité, allant des utilisateurs monomodaux de l'automobile aux utilisateurs exclusifs des modes actifs, avec les usagers multimodaux situés entre ces deux extrêmes.

Les politiques qui encouragent la marche, le vélo et les transports en commun pourraient ainsi accroître la multimodalité parmi les automobilistes actuels, en favorisant un déplacement progressif vers des modes de transport plus durables. Même une utilisation occasionnelle d'alternatives à la voiture peut avoir un impact significatif sur les comportements de déplacement

à long terme, en familiarisant progressivement les usagers à ces alternatives (Chlond 2012; Diana et Mokhtarian 2009). En fin de compte, ces politiques pourraient bénéficier à une part bien plus grande de la population que ce que les enquêtes traditionnelles sur les déplacements laissent penser, car de nombreux automobilistes utilisent déjà d'autres modes de transport pour une partie de leurs déplacements.

2.6 Synthèse

La revue de littérature met en lumière plusieurs points essentiels concernant les interactions entre les vélos et les transports en commun dans les espaces urbains, tout en soulignant la prédominance de l'automobile dans les villes nord-américaines. Le cadre théorique du développement durable, qui structure ces réflexions, souligne l'urgence de repenser la répartition de l'espace public pour favoriser des modes de transport plus durables, tels que le vélo et le transport collectif. Cependant, la cohabitation entre ces modes est complexe. Bien qu'ils soient cruciaux pour la mobilité urbaine, ils se retrouvent souvent en compétition pour l'espace et les ressources.

Les études révèlent une complémentarité potentielle entre le vélo et les transports en commun, notamment en termes de connectivité pour les derniers kilomètres, mais aussi des conflits fréquents, particulièrement sur les voies partagées bus-vélo, aux arrêts de bus et aux intersections, où les différences de vitesse et de maniabilité posent des risques pour la sécurité. En parallèle, la multimodalité, c'est-à-dire l'usage de plusieurs modes de transport, apparaît comme une solution prometteuse pour réduire la dépendance à l'automobile et mieux intégrer les modes actifs et collectifs dans les déplacements quotidiens.

Cependant, des lacunes persistent dans les recherches actuelles. En particulier, il manque des outils et des méthodologies qui permettent de mesurer efficacement l'accessibilité cyclable autour des stations de transport en commun en tenant compte du confort cyclable. De plus, une approche simple et reproductible pour évaluer cette accessibilité dans différents contextes urbains est nécessaire. La présente étude vise précisément à combler cette lacune en proposant un outil méthodologique permettant d'évaluer et d'améliorer l'accessibilité cyclable autour des stations de transport en commun, en intégrant la dimension du confort des cyclistes.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie employée pour définir les bassins d'accessibilité cyclable autour des nœuds de transports en commun de Montréal, ainsi que les indicateurs utilisés pour diagnostiquer la qualité de l'accès aux stations. Cette approche comprend plusieurs composantes clés :

- **Calcul des bassins d'attraction cyclables** : Les bassins d'attraction sont délimités en prenant en compte les critères de confort cyclable, afin d'évaluer l'accessibilité actuelle autour des nœuds de transport en commun.
- **Développement d'indicateurs d'accessibilité** : Des indicateurs spécifiques sont développés pour caractériser et comparer l'accessibilité entre les stations, permettant une analyse quantitative de l'efficacité des connexions cyclables.
- **Scénarios d'amélioration du réseau cyclable** : Des propositions d'amélioration du réseau cyclable sont formulées et leurs impacts sont évalués, envisageant des ajustements infrastructurels.

3.1 Mise en contexte

La méthodologie de diagnostic de l'accessibilité cyclable vise à créer un modèle simple, transposable et utilisant des données et des outils libres, facilitant ainsi son application dans d'autres contextes ou villes. Cette approche permet non seulement de garantir la répliquabilité des interventions proposées mais aussi d'adapter ces dernières aux particularités locales de chaque environnement urbain ou à différentes hypothèses de recherche. Cette méthodologie offre une analyse détaillée des stations de transport en commun actuelles et des potentielles améliorations de l'accessibilité cyclable dans la ville de Montréal.

Estimer l'accessibilité d'un trajet cyclable implique de considérer plusieurs facteurs complexes. Parmi eux, la sécurité est un aspect primordial et intrinsèquement subjectif, dépendant largement de la perception individuelle de chaque cycliste. Cette perception peut être influencée par divers paramètres tels que le genre, l'âge, les conditions météorologiques et la saison, qui modifient la faisabilité et l'attractivité d'un trajet à vélo. Par exemple, un tronçon de route peut être emprunté par un cycliste expérimenté, tandis qu'un novice pourrait le percevoir comme intimidant ou dangereux.

Dans cette optique, notre objectif est de déterminer des surfaces accessibles qui seraient universellement acceptées comme praticables à vélo. Cette universalité dans l'évaluation de l'accessibilité est cruciale pour élaborer des politiques inclusives qui prennent en compte les besoins et les perceptions de sécurité de tous les cyclistes, indépendamment de leur expérience ou de leur condition physique.

3.2 Territoire d'étude

Le territoire sélectionné pour cette étude englobe l'ensemble de l'île de Montréal ainsi que certaines parties des villes adjacentes de Laval, Brossard et Longueuil, desservies par le métro et le Réseau Express Métropolitain (REM). Ces territoires sont étudiés car ils sont desservis par le réseau de transport publique structurant, dans le cadre de cette analyse de la complémentarité entre le transport en commun et le vélo. Nous démontrerons par la suite que la méthodologie développée pour analyser l'accessibilité cyclable peut être appliquée à n'importe quel point d'intérêt, à condition que les données de réseau soient disponibles.

Les points d'intérêt sur lesquels nous appliquons notre méthodologie sont les édicules des stations de métro et du Réseau Express Métropolitain (REM). Un édicule désigne une petite construction, servant d'entrée principale ou secondaire à une infrastructure souterraine telle qu'une station de métro. Ils peuvent varier en taille et en design, allant de simples entrées discrètes intégrées dans des bâtiments existants à des constructions architecturales distinctes et visibles.

Le métro de Montréal comporte quatre lignes principales : la Ligne 1 (Verte), la Ligne 2 (Orange), la Ligne 4 (Jaune), et la Ligne 5 (Bleue). En ce qui concerne le REM, notre étude se concentre sur les stations en fonctionnement au moment de la réalisation de cette recherche, à savoir le tronçon allant de Brossard à Gare Centrale. Au total, cette étude prend en compte 156 édicules correspondant à 72 stations.

3.3 Sources de données

Pour la création des surfaces accessibles nécessaires à notre étude, nous avons utilisé les données des réseaux routier et cyclable provenant de plusieurs sources :

- **Données Ouvertes des Villes de Montréal et Laval (Février 2024)**

Les données incluent un **réseau routier** et un **réseau cyclable** détaillé, constitué de segments de droite appelés « tronçons ». Chaque tronçon, qui représente les différentes voies de circulation, est

numérisé généralement au centre de la rue, et possède des attributs tels que des plages d'adresses et des références aux limites administratives. Les tronçons sont classés de 0 à 9, reflétant leur usage de rues locales à autoroutes et voies projetées pour le réseau routier.

Le réseau cyclable comprend l'ensemble des infrastructures cyclables sur le territoire de l'agglomération de Montréal et Laval, avec des informations détaillées sur le type d'infrastructure et l'accessibilité en toutes saisons.

L'utilisation du réseau cyclable fourni par la Ville de Montréal pour notre étude offre plusieurs avantages pratiques. Premièrement, ce réseau est homogène et complet, fournissant une base de données cohérente et immédiatement disponible pour toute la ville.

Cependant, notre étude vise à évaluer l'accessibilité cyclable de manière universelle, ce qui soulève certaines complexités. L'accessibilité universelle implique de déterminer quels aménagements sont véritablement accessibles à tous les cyclistes, quelle que soit leur expérience ou leur capacité. Par exemple, une bande cyclable située au bord d'un boulevard très fréquenté peut ne pas être considérée comme sûre pour un cycliste novice ou pour les enfants. De même, une piste cyclable qui n'est pas bien éclairée, entretenue, ou déneigée en hiver, pourrait ne pas être fonctionnelle ou sûre tout au long de l'année.

Fixer une limite claire sur ce qui constitue un aménagement cyclable universellement accessible impliquerait une analyse détaillée de chaque segment du réseau, en tenant compte de nombreux paramètres qui peuvent varier dans le temps. Face à cette complexité et aux contraintes de temps et de ressources, nous avons opté pour une simplification pratique en utilisant le réseau cyclable tel que proposé par la ville, tout en reconnaissant que ce choix peut comporter certaines limitations.

- **OpenStreetMap (OSM) via QuickOSM (Février 2024)**

Pour les zones comme Brossard, Longueuil et Saint Lambert, le réseau n'est pas toujours disponible dans les données ouvertes, les **réseaux routier** et **cyclable** ont donc été extraits d'OSM. Contrairement aux données ouvertes, OSM peut inclure plusieurs segments pour un seul axe routier, représentant différentes voies ou directions. La différence entre les sources de données crée une hétérogénéité dans le réseau. Cette considération est importante à prendre en compte car elle influencera certains résultats.

Toutes les données de réseau sont soigneusement nettoyées pour corriger les erreurs et normalisées pour garantir la cohérence entre les différentes sources. Cela inclut l'harmonisation des formats de

données et l'ajustement des attributs pour assurer une comparabilité fiable lors de la génération des isochrones.

Les données nettoyées sont intégrées dans un système d'information géographique (QGIS), qui sert de plateforme pour la production des isochrones, l'analyse spatiale et la visualisation des résultats.

- **Recensement Canadien de la population (2021)**

Pour l'analyse des résultats, on utilise les **données démographiques du recensement** de la population de Statistique Canada à l'échelle de l'aire de diffusion. Ces données sont employées pour contextualiser les résultats des isochrones en termes de population affectée.

3.4 Choix de l'outil de calcul des bassins d'accessibilité

De nombreux outils existent pour calculer les itinéraires cyclables et, par extension, générer des isochrones qui représentent des surfaces accessibles dans un temps donné à partir d'un point spécifique. Cependant, le choix de l'outil approprié pour cette étude est guidé par trois critères essentiels qui assurent à la fois la praticabilité et la pertinence de l'analyse.

Premièrement, l'outil doit être open source. Ce critère garantit la transparence des méthodes utilisées et offre la possibilité de personnaliser l'outil selon les besoins spécifiques de l'étude, tout en permettant une collaboration étendue avec la communauté de chercheurs.

Deuxièmement, il est crucial que l'outil prenne en compte les critères de confort cyclable. Cela signifie qu'il doit pouvoir intégrer des variables telles que la présence d'un réseau cyclable sécuritaire, mais aussi d'autres facteurs qui influencent directement l'expérience et la sécurité des cyclistes comme les pentes.

Troisièmement, l'outil doit être relativement simple d'utilisation pour faciliter son déploiement rapide et efficace, ainsi que pour permettre aux utilisateurs de divers horizons techniques de l'adopter sans nécessiter une formation complexe ou une expertise approfondie en informatique.

3.4.1 Outil Open Source

Dans le cadre de cette étude, l'ouverture et la transparence de l'outil utilisé pour le calcul des itinéraires et des isochrones sont primordiales. Bien que des solutions comme Google Maps soient reconnues pour leur simplicité d'utilisation et leur capacité à intégrer des critères de confort cyclable, elles ne sont pas adaptées à notre recherche en raison de leur nature propriétaire. Ces outils proposent des API qui peuvent s'avérer onéreuses et ne permettent pas une personnalisation

poussée ni un accès libre aux algorithmes et aux données sous-jacentes, ce qui est crucial pour une étude détaillée et spécifique comme la nôtre.

Un autre outil examiné lors de la phase préparatoire de cette étude est CycleStreets un calculateur d'itinéraires cyclistes qui propose trois types de parcours : un chemin rapide pour les cyclistes expérimentés, un chemin paisible qui évite les voies les plus achalandées et un chemin équilibré convenant à la majorité des cyclistes, d'après la documentation. Ce calculateur utilise les données d'OpenStreetMap et effectue plusieurs opérations avant d'appliquer l'algorithme A*. Le chemin le plus rapide minimise le temps de parcours en évitant les montées abruptes et en privilégiant les surfaces lisses et les routes directes. Le chemin le plus paisible, quant à lui, est défini en fonction de l'achalandage estimé des voies, favorisant les voies cyclables et les rues moins fréquentées et tenant compte des limites de vitesse automobiles. Le chemin équilibré offre un compromis entre les deux.

Cet outil présente des limitations significatives pour notre recherche. Le principal inconvénient est que, bien que les poids attribués à différents paramètres dans le calcul de la fonction de coût généralisée soit connus, son code source n'est pas entièrement ouvert. Ainsi, bien que nous connaissions les facteurs influençant les calculs, l'impossibilité de modifier précisément les poids attribués à chaque variable comme nous le souhaitons limite son utilité pour notre projet. Par conséquent, pour la suite de l'étude, nous privilégions l'utilisation d'outils entièrement open source pour garantir une transparence et une personnalisation complètes dans nos analyses.

3.4.2 Outil prenant en compte le confort cyclable

Pour cette étude, il est essentiel de sélectionner un outil non seulement open source, mais qui intègre également de manière approfondie le confort cyclable dans le calcul des itinéraires vélo. Au cours de la phase préparatoire de notre recherche, le calculateur Valhalla s'est de prime abord distingué comme une option particulièrement adaptée.

3.4.2.1 Présentation du calculateur Valhalla

Valhalla est un calculateur de chemin dont la documentation et les algorithmes sont entièrement disponibles sur Github, basé sur les données cartographiques libres de OpenStreetMap. Cet outil développé par l'équipe Mapzen possède différentes fonctionnalités comme le calcul d'itinéraires, de trajets, d'isochrones, de matrices de distances de déplacement ou de l'analyse de réseau et ce,

de façon dynamique et en prenant en compte différents modes de transport simultanément. Les avantages de cet outil pour notre étude est qu'il permet de générer directement des isochrones et de prendre en compte le confort cyclable dans les itinéraires, en laissant la liberté de faire varier les paramètres de confort cyclable.

3.4.2.2 Fonctionnement

Le fonctionnement de Valhalla repose sur un calcul qui détermine les surfaces accessibles à partir d'un point donné dans des intervalles de temps spécifiés, produisant des polygones ou des lignes dans un format GeoJSON. Ces résultats peuvent ensuite être visualisés facilement sur une carte.

Pour cela, le modèle de Valhalla utilise un algorithme de calcul de chemin basé sur l'algorithme A*. Le réseau routier utilisé est le réseau OSM. Celui-ci est composé de segments et de nœuds. Le calcul du chemin optimal est effectué en attribuant à chaque segment un poids qui dépend de plusieurs variables, telles que la longueur, la vitesse, la pente, le type et la surface de la route, les limitations de vitesse et les préférences de l'utilisateur. L'itinéraire choisi est celui qui présente le poids total le plus faible, indiquant le trajet le plus optimal.

La spécificité de Valhalla réside dans sa capacité à moduler la vitesse sur chaque segment en fonction de la pente et d'autres critères de confort cyclable. Pour la prise en compte des pentes, l'outil calcule l'altitude à des intervalles de 60 mètres en utilisant un modèle d'élévation numérique global pour estimer la pente de chaque segment. Un coefficient ajusté est appliqué en fonction de la pente: des pentes plus accentuées entraînent un coût de déplacement plus élevé, réduisant ainsi l'attractivité de ces routes par rapport à des alternatives plus longues mais moins pentues.

De plus, Valhalla offre la possibilité de personnaliser l'expérience du cycliste avec des paramètres tels que `use_hills`, qui ajuste la tolérance du cycliste aux pentes. Une valeur proche de 0 signifie une préférence pour éviter les pentes, tandis qu'une valeur proche de 1 indique une moindre aversion aux montées. La valeur par défaut de 0.5 est choisie.

Dans cette étude, nous portons un intérêt particulier au paramètre `use_roads` de Valhalla, dont le fonctionnement est similaire à celui de `use_hills`. Ce paramètre varie entre 0 et 1, reflétant la tolérance du cycliste à utiliser différents types de routes. Une valeur proche de 0 indique une préférence pour les voies cyclables et les routes moins fréquentées, adaptées aux cyclistes, tandis qu'une valeur proche de 1 suggère une plus grande acceptation de partager la route avec des

automobiles. La modulation de ce paramètre est essentielle pour comprendre l'impact des préférences des cyclistes sur les itinéraires suggérés par l'outil.

Valhalla intègre plusieurs bibliothèques spécialisées, chacune gérant différentes fonctions du calculateur. La bibliothèque qui nous intéresse particulièrement est nommée `sif`, utilisée principalement pour le calcul des coûts appliqués aux nœuds et aux segments du réseau. Nous nous focalisons sur l'algorithme `bicyclecost.cc`, qui orchestre les calculs pour le mode vélo. Cet algorithme, écrit en C++, est trop complexe pour être entièrement détaillé ici, mais il est disponible pour consultation détaillée au lien suivant

(<https://github.com/valhalla/valhalla/blob/3.1.0/src/sif/bicyclecost.cc#L1>).

L'algorithme utilise par défaut une méthode standard pour calculer les coûts de déplacement à vélo, avec une préférence pour les voies cyclables et les routes dotées d'aménagements pour cyclistes. Les itinéraires vélo de Valhalla tendent à suivre les routes nécessaires tout en évitant celles interdites aux vélos.

Le paramètre `use_roads` influence significativement la façon dont ces coûts sont calculés, permettant d'accentuer ou d'atténuer la préférence pour les infrastructures cyclables. En ajustant ce paramètre, les utilisateurs peuvent donc personnaliser les itinéraires selon leur confort et sécurité désirés. Un diagramme en annexe A illustre en détail comment la variable `use_roads` interagit avec les différents modules de l'algorithme, offrant une perspective claire sur son influence directe sur les résultats de routage.

3.4.2.3 Limitations pour notre étude

Au cours des travaux préliminaires, nous avons réalisé diverses manipulations avec l'outil Valhalla, dont les détails sont fournis en annexe B. Bien que Valhalla soit doté de fonctionnalités robustes pour le calcul d'itinéraires et d'accessibilité, nos résultats ont mis en évidence certaines limites pour l'utilisation spécifique que nous en faisons.

Le principal problème rencontré avec Valhalla est la rigidité des variables sous-jacentes dans le calcul des coûts. Bien que l'outil offre la possibilité de modifier les paramètres tels que `use_roads` et `use_hills`, les variables dérivées de ces paramètres dans le calcul restent fixes. Cette restriction nous empêche de personnaliser pleinement les poids des différentes variables entrant dans les

fonctions de coûts généralisés, limitant ainsi la portée des hypothèses, des analyses et des scénarios que nous pouvons explorer.

De plus, notre étude vise à intégrer finement les paramètres de confort cyclable, une tâche qui s'avère complexe avec Valhalla. Les ajustements permis par le paramètre `use_roads` se sont révélés insuffisants pour nos besoins, car la variation induite par ce paramètre n'a pas été clairement compréhensible dans nos tests. Cela souligne un besoin critique pour un outil permettant une modulation plus détaillée, simple et transparente des paramètres influençant directement le confort cyclable.

Un autre objectif spécifique de notre étude est de simuler des scénarios d'amélioration du réseau cyclable. En théorie, ajuster le paramètre `use_roads` vers une valeur moins tolérante pourrait simuler une amélioration de la qualité du réseau. Cependant, les résultats de notre analyse des variations des bassins d'attraction en réponse à ces ajustements de paramètres ont montré que les améliorations étaient difficiles à interpréter, ce qui complique l'évaluation des impacts potentiels des améliorations du réseau.

En conclusion, bien que Valhalla soit bien adapté pour des applications directes de calcul d'itinéraires cyclables ou d'accessibilité, il ne répond pas entièrement aux exigences de notre étude qui nécessite un contrôle plus approfondi et plus flexible des paramètres de coût. Nous sommes donc en quête d'un outil offrant une plus grande flexibilité de personnalisation des fonctions de coût généralisé pour répondre précisément à nos objectifs de recherche.

3.4.3 Outil simple d'utilisation

On cherche un outil ouvert et qui permette de moduler finement les poids appliqués à différents paramètres, pour prendre en compte le confort cyclable dans les calculs. Pour cela une solution possible est l'utilisation d'un calculateur de chemin dont le fonctionnement est similaire à Valhalla mais dont l'ensemble des paramètres peut être modifié. Une solution parfaite pour cela serait le calculateur de chemin OSRM développé par la Chaire Mobilité.

OSRM représente une option qui répond à nos critères d'ouverture et de flexibilité. Ce calculateur de chemin, écrit en C++ et conçu pour fonctionner avec les données OpenStreetMap, offre divers services via une API et une interface de bibliothèque C++, incluant des fonctions de calcul

d'itinéraire, de correspondance avec le réseau routier et de résolution de problèmes de routage complexes.

Cette solution pourrait convenir pour ce projet mais on va utiliser une solution plus simple et qui, dans notre cas, permet de réaliser des analyses similaires : l'outil d'analyse de réseau de QGIS. En effet, tel que précisé plus haut, l'outil doit être relativement simple d'utilisation pour faciliter son déploiement rapide et efficace, ainsi que pour permettre aux utilisateurs de divers horizons techniques de l'adopter sans nécessiter une expertise approfondie en informatique, ou des capacités de calculs extraordinaires.

3.4.4 L'outil retenu

Pour l'analyse de l'accessibilité cyclable aux stations de transport en commun, l'outil retenu est l'algorithme "zone de desserte" intégré à QGIS. Cette décision a été prise après une évaluation approfondie des options disponibles, où la simplicité d'utilisation, la prise en compte des critères de confort cyclable et le caractère open source des outils et données ont été des facteurs déterminants.

L'algorithme "zone de desserte" de QGIS est un outil destiné à analyser l'accessibilité spatiale en utilisant une approche géométrique. Contrairement à des outils plus complexes comme OSRM ou Valhalla, qui nécessitent une configuration et une gestion approfondies des paramètres de routage, cet algorithme offre une solution plus directe et moins technique.

Basé sur l'algorithme Dijkstra, l'outil "zone de desserte" fonctionne en calculant les zones accessibles en se basant uniquement sur la distance géométrique et une vitesse prédéfinie, sans prendre en compte des facteurs comme la surface, le type de rue, la pente ou la limite de vitesse. Cette approche simplifiée permet de fixer des vitesses différentes pour les tronçons qui font partie du réseau cyclable comparativement à ceux qui n'en font pas partie.

L'annexe C présente une comparaison entre les isochrones générées par le calculateur Valhalla et celles produites par l'algorithme d'analyse de réseau de QGIS. Cette comparaison démontre que les résultats fournis par QGIS correspondent mieux aux objectifs de notre recherche, qui vise à déterminer des bassins d'accessibilité cyclable universelle.

Tableau 3.1 Résumé des critères de choix de l'outil de calcul des isochrones

Outil Critère	Google, Cycle Street	Valhalla	OSRM	Algorithme « zone de desserte » QGIS
Open Source	✗	✓	✓	✓
Prise en compte du confort cyclable	~	~	✓	✓
Simplicité	✓	✓	~	✓

3.5 Création des bassins d'attraction cyclable

La création des bassins d'attraction cyclable suit différentes étapes qui sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

3.5.1 Étape 1 : Définition du réseau

Pour la création des bassins d'attraction cyclable, notre méthodologie repose sur la superposition de deux réseaux distincts : le réseau cyclable et le réseau routier. Cette approche permet d'appliquer des vitesses différentes selon le type de segment emprunté par le cycliste. La Figure 3.1 permet de visualiser les deux réseaux superposés, en prenant comme exemple la station De Castelnau, sur la ligne Bleue.

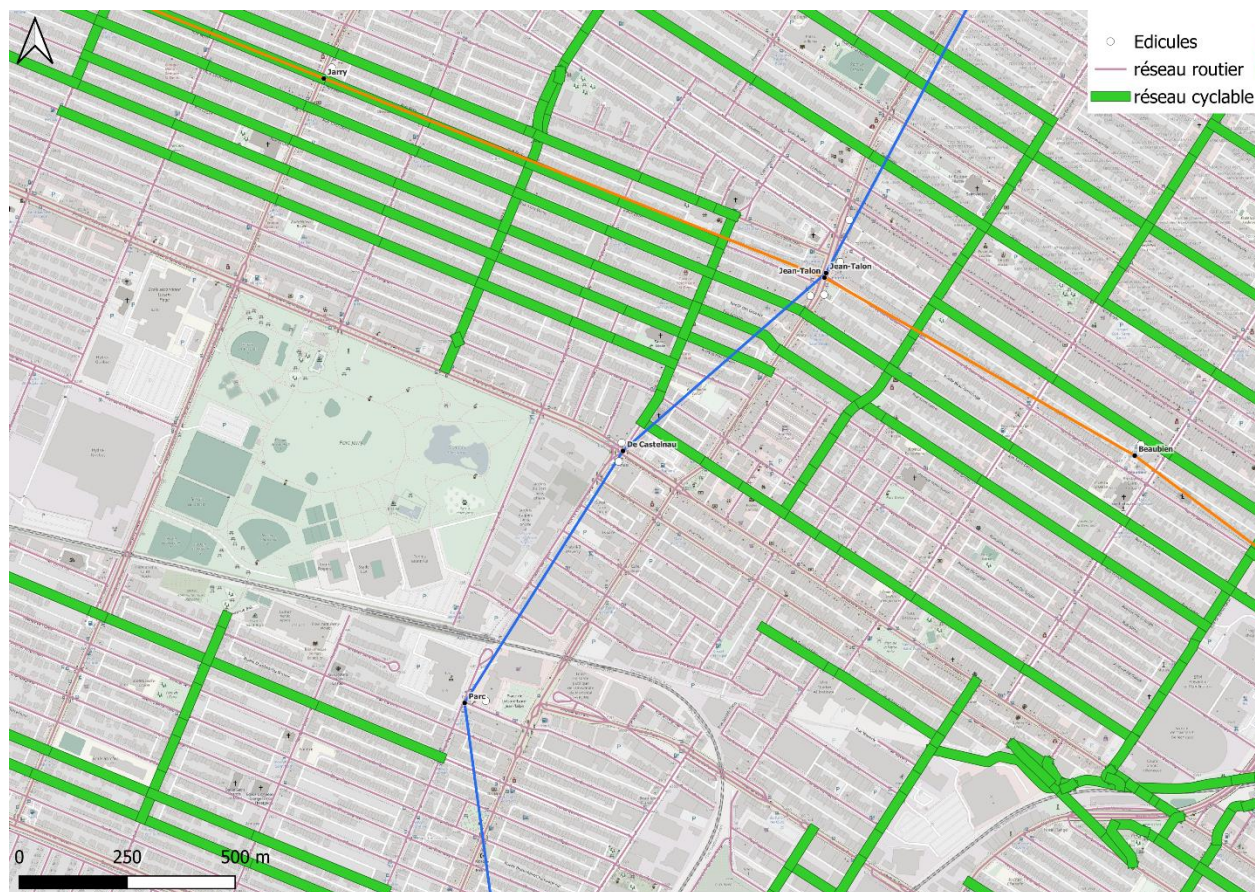


Figure 3.1 Définition du réseau

3.5.2 Étape 2 : Calcul des isochrones

Nous employons l'outil d'analyse de réseau 'zone de desserte' intégré à QGIS pour calculer les isochrones, en se basant sur les réseaux cyclable et routier définis précédemment. Le calcul est effectué pour différents pas de temps : 5, 10 et 15 minutes, permettant de visualiser l'accessibilité à différentes échelles temporelles.

La spécificité de cette étude réside dans la modification de la valeur 'Champ de vitesse'. Les vitesses suivantes sont appliquées en fonction des tronçons :

- 12 km/h pour les tronçons cyclables.

Cette valeur est choisie car c'est la vitesse commerciale des vélos en libre-service (Bixi) à Montréal (Godefroy, 2011).

- 5 km/h pour les tronçons routiers.

On considère que si un segment routier ne fait pas partie du réseau cyclable, alors il n'est

pas assez sécuritaire pour être emprunté à vélo par tous, donc l'utilisateur doit marcher. L'approche stricte adoptée pour les vitesses sur les tronçons non cyclables assure que les isochrones reflètent une estimation minimale de l'accessibilité, sécuritaire pour tous les usagers, y compris les moins expérimentés. Cette méthodologie, bien que conservatrice, permet de définir des objectifs clairs pour l'amélioration du réseau cyclable en identifiant les zones où l'accessibilité actuelle est limitée.

- 0 km/h pour les tronçons autoroutiers

Ces segments sont dédiés aux modes motorisés.

Une limitation notable de cette approche est l'absence de prise en compte des pentes, un facteur pourtant déterminant dans l'appréciation de l'accessibilité cyclable. Une amélioration future de la méthodologie pourrait impliquer l'ajustement du 'champ de vitesse' en fonction de la pente de chaque segment pour affiner les résultats.

De plus, il est important de préciser que dans cette étude, nous considérons qu'un usager ayant atteint n'importe quel édicule d'une station a effectivement accédé à la station elle-même. Cela ne prend pas en compte le temps de sécuriser son vélo ainsi que le temps de marche à l'intérieur de la station pour accéder au quai, ni le temps d'attente du métro. Cette hypothèse simplifie l'analyse tout en focalisant sur l'accès initial aux infrastructures de transport en commun mais constitue une limite qu'il est important de souligner. Un comptage a été réalisé en annexe D pour tester la validité de cette hypothèse en comptant le nombre de stationnement vélo des stations de métro de la ligne Bleue, ainsi que la distance entre le stationnement et l'entrée de l'édicule.

Par ailleurs, bien que les intersections ne soient pas spécifiquement pénalisées dans notre modèle, la vitesse utilisée est une vitesse commerciale, calculée comme une moyenne sur l'ensemble d'un trajet, incluant donc les ralentissements aux intersections.

Le résultat obtenu par l'algorithme de QGIS est une couche polygones contenant une entité par édicule et par pas de temps, représentant toutes les isochrones.

La Figure 3.2 présente le résultat du calcul pour la station De Castelnau. En rouge, on obtient l'ensemble des rues accessibles à vélo depuis la station pour une durée maximale de 5 minutes. On remarque que les distances parcourues le long des segments cyclables sont bien supérieures à celle parcourues sur les segments routiers, ce qui confirme bien que les isochrones calculées sont influencées par la présence d'un réseau cyclable.

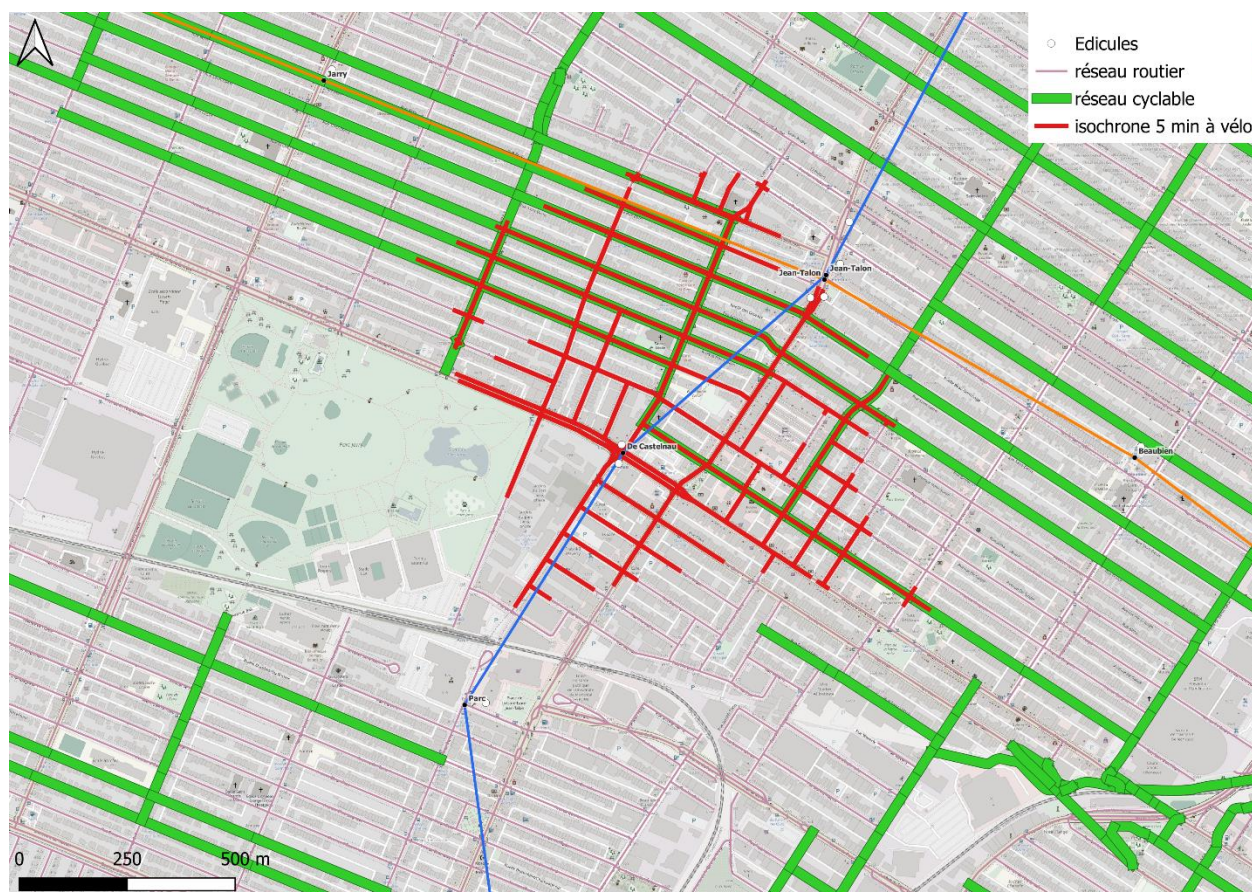


Figure 3.2 Calcul des isochrones

3.5.3 Étape 3 : Calcul des surfaces accessibles

Après avoir généré des isochrones sous forme de polygones avec QGIS, nous procédons à leur conversion en surfaces pour faciliter l'analyse spatiale. Différentes étapes de traitement des couches géospatiales sont ici effectuées :

- Création de surfaces tampon.

Cette transformation est réalisée par la création d'une surface tampon autour de chaque ligne. Nous appliquons une surface tampon de 60 mètres. Cette distance a été déterminée par essai erreur, la problématique étant que la densité de rue dans notre territoire d'étude varie significativement entre des zones urbaines relativement denses et des zones moins peuplées. Dans les zones denses, une zone tampon trop large pourrait faire que les zones accessibles d'une rue empièteraient de manière irréaliste sur celles des rues adjacentes. Inversement, dans les zones moins denses, une zone tampon

trop petite pourrait laisser de grands espaces vides entre les rues, sous-estimant ainsi l'accessibilité cyclable. La Figure 3.3 illustre la création d'une surface de 60 m autour des polygones.

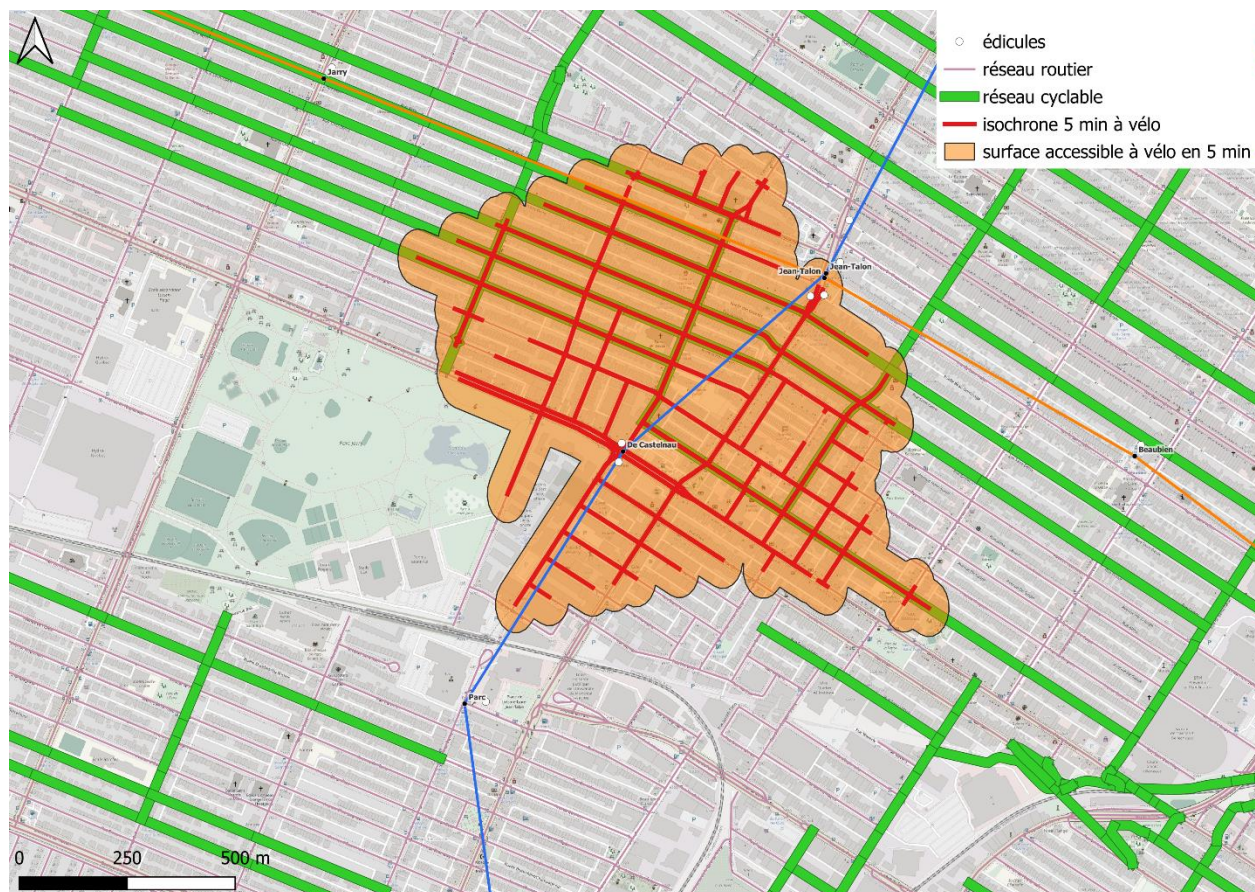


Figure 3.3 Calcul des surfaces accessibles

- Union spatiales pour les stations à plusieurs édicules.

Lorsqu'une station comporte plusieurs édicules, nous regroupons les isochrones de chaque entrée pour obtenir une mesure complète de l'accessibilité à partir de toute la station. Cette agrégation est réalisée par une union spatiale des surfaces tampons, permettant de visualiser l'étendue totale des zones accessibles à vélo depuis n'importe quel édicule de la station (Chekir, 2023). La Figure 3.4 illustre la surface totale obtenue par la fusion des surfaces de chaque édicule de la station Laurier.

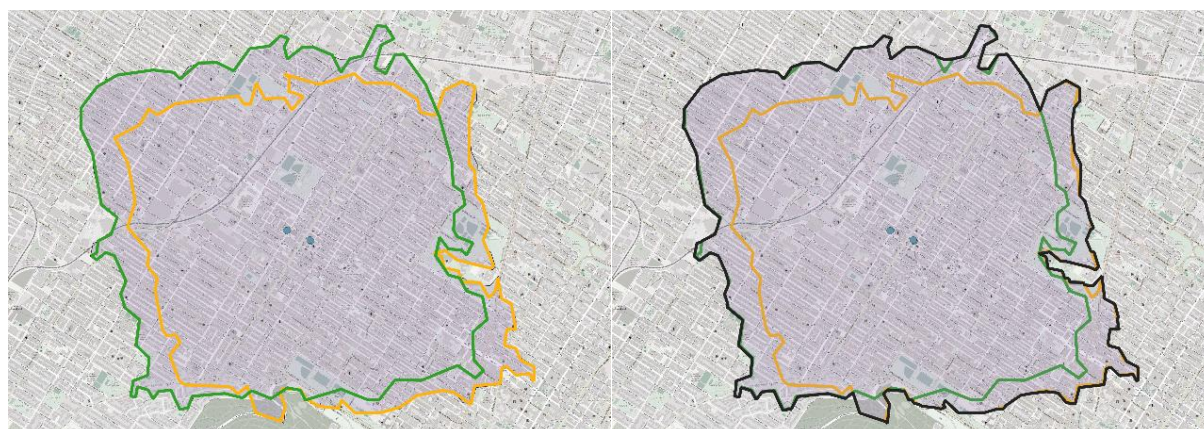


Figure 3.4 Union spatiale des isochrones des différents édifices

- Suppression des trous dans les multipolygones.

Enfin, nous utilisons un outil de QGIS pour éliminer les discontinuités ou "trous" à l'intérieur des multipolygones résultants. Cette étape est cruciale car elle permet d'inclure des petites zones internes non couvertes par les tampons initiaux mais entourées de voies accessibles.

Cette correction est particulièrement pertinente dans les zones moins denses, comme certaines parties de Laval, où les configurations de rue peuvent créer des poches isolées. En fermant ces trous, nous assurons que notre analyse reflète une continuité d'accessibilité, évitant de sous-estimer les zones véritablement accessibles.

La Figure 3.5 montre la pertinence de prendre en compte les trous dans une zone comme Laval, où l'espacement des rues crée des poches non accessibles (en jaune) entre les zones tampon.

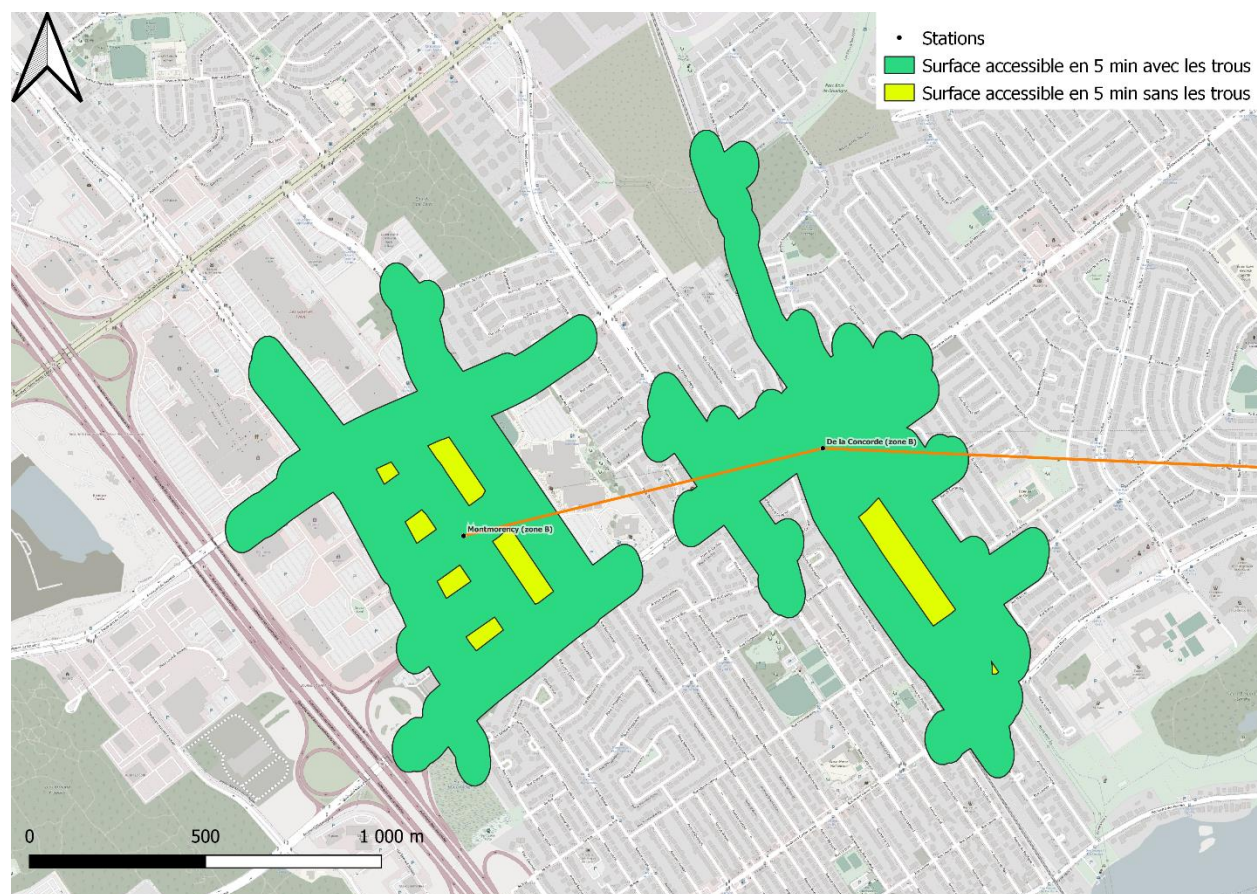


Figure 3.5 Comparaison des isochrones avec et sans les trous

Cette méthodologie est appliquée pour des pas de temps de 5, 10 et 15 minutes. La Figure 3.6 illustre les résultats obtenus pour la station De Castelnau. La section prochaine détaille la création des indicateurs utilisés pour analyser les isochrones obtenues.

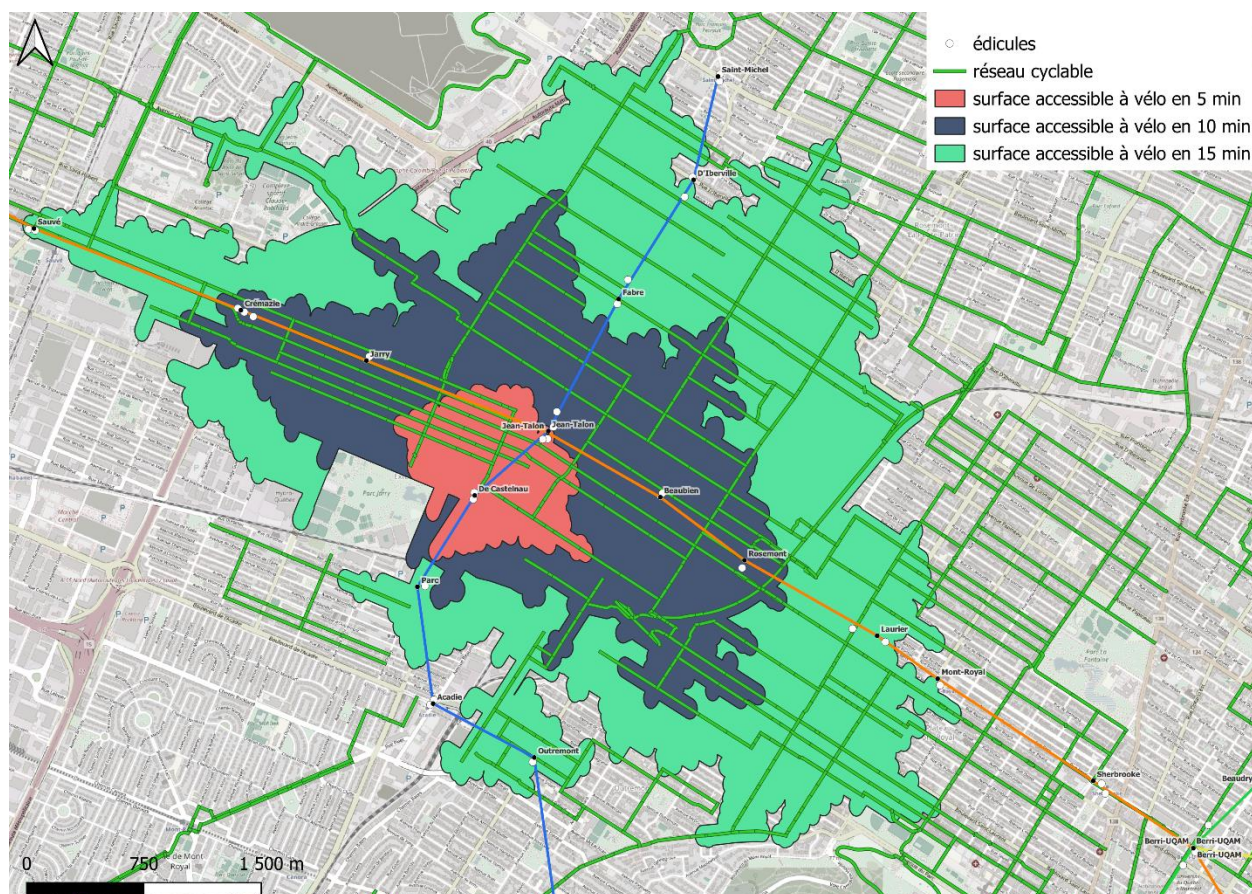


Figure 3.6 Isochrones obtenues pour la station De Castelnau à différents pas de temps

3.6 Choix des indicateurs

Pour étudier les bassins d'attraction cyclable autour des différentes stations de transport en commun, il faut sélectionner des indicateurs pertinents qui nous permettront de caractériser, d'analyser et de comparer ces espaces, tout en identifiant les facteurs qui influencent leur accessibilité. Ces indicateurs servent non seulement à mesurer directement l'étendue et la qualité des zones accessibles, mais aussi à comprendre les interactions entre le réseau cyclable et l'environnement urbain environnant.

Dans notre étude, nous avons classé les indicateurs en trois catégories principales, chacune ciblant des aspects spécifiques des bassins d'attraction, présentés dans la Figure 3.7.

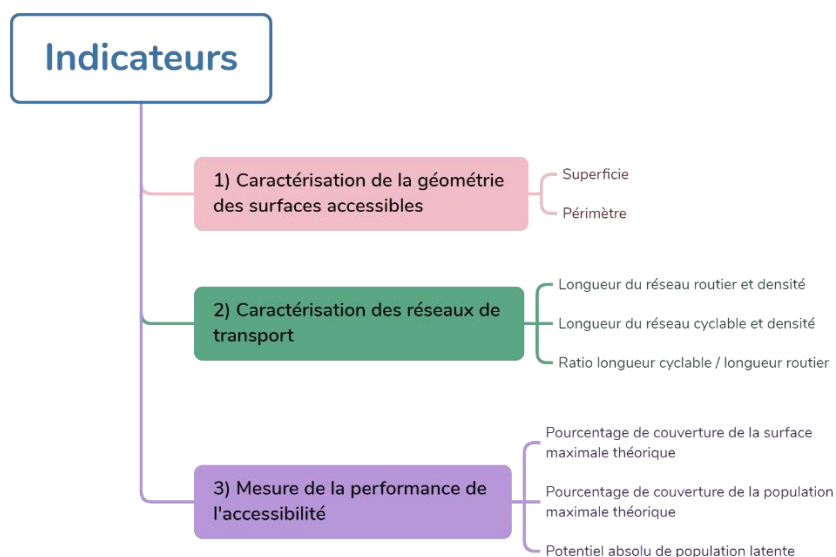


Figure 3.7 Liste des différents indicateurs choisis

1) Caractérisation de la géométrie des surfaces accessibles

Cette catégorie inclut des mesures telles que la superficie et le périmètre des zones accessibles. Ces indicateurs sont fondamentaux pour quantifier l'espace physique couvert par les réseaux cyclables à partir des points de transport en commun.

2) Caractérisation des réseaux de transport

Les indicateurs mesurent la longueur du réseau routier, la longueur de réseau cyclable et leur densité dans les zones étudiées. Ces mesures nous aident à comprendre la structure et la densité des infrastructures de transport.

3) Mesure de la performance d'accessibilité

Dans cette section, on introduit des indicateurs qui mesurent la performance de l'accessibilité des différentes stations. On examine le pourcentage de couverture de la surface maximale théorique et le pourcentage de couverture de la population maximale théorique, ainsi que le potentiel absolu de population latente. Ces indicateurs permettent d'évaluer l'efficacité de l'accessibilité cyclable par rapport à un idéal théorique, offrant ainsi une perspective sur les améliorations potentielles et l'efficacité du réseau cyclable existant.

3.6.1 Superficie

L'indicateur de superficie est déterminé en calculant la surface totale des zones accessibles à vélo à partir des stations. La superficie de ces bassins d'attraction reflète directement l'étendue de l'accessibilité et, par extension, la qualité de la connexion des infrastructures cyclables disponibles.

Une superficie étendue des bassins d'attraction signifie que les cyclistes peuvent accéder à une station depuis des points plus éloignés, ce qui indique généralement une bonne intégration du réseau cyclable avec le réseau de transport en commun. Cela suggère non seulement que l'accessibilité est élevée, mais aussi que la station est potentiellement attrayante pour un plus grand nombre d'utilisateurs, favorisant ainsi l'usage combiné du vélo et des transports publics.

3.6.2 Périmètre

Cet indicateur permet d'évaluer la complexité géométrique des zones d'accessibilité cyclable autour des stations. Contrairement à l'indicateur de superficie qui mesure l'étendue des zones accessibles, le périmètre fournit des informations précieuses sur la forme et la complexité des contours de ces zones (Chekir, 2023). La mesure du périmètre des courbes d'accessibilité offre un aperçu de la continuité et de l'uniformité du réseau cyclable. Un périmètre long et complexe peut indiquer la présence de nombreux détours, de discontinuités dans les voies cyclables ou de configurations de réseau qui obligent les cyclistes à suivre des itinéraires indirects pour atteindre leur destination. Cette caractéristique peut révéler des défis dans la praticité et l'efficacité du réseau cyclable, suggérant que les trajets peuvent être moins directs et donc potentiellement moins attrayants pour les utilisateurs.

Analyser le périmètre des zones d'accessibilité permet donc non seulement de comprendre l'étendue géographique de l'accessibilité, mais aussi de juger de la qualité de l'infrastructure cyclable en termes de facilité et d'efficacité des déplacements. Cela peut également aider à identifier les zones où des améliorations du réseau cyclable pourraient rendre les trajets plus directs et plus agréables pour les utilisateurs, améliorant ainsi l'intégration globale des modes de transport et la satisfaction des cyclistes.

3.6.3 Longueur du réseau routier et densité

Cet indicateur consiste à mesurer la somme totale des segments routiers situés à l'intérieur des isochrones d'accessibilité cyclable générées pour chaque station. Cette mesure fournit une base quantitative pour évaluer l'infrastructure routière autour des points de transport en commun.

Pour aller plus loin dans l'analyse, cette longueur est ensuite rapportée à la superficie totale des isochrones pour calculer la densité des rues. Ce rapport permet d'évaluer la densité de la trame urbaine autour des zones étudiées.

Par ailleurs, cet indicateur sert de base pour des analyses de corrélation, permettant de déterminer dans quelle mesure la densité du réseau routier influence les performances d'accessibilité du réseau cyclable.

3.6.4 Longueur du réseau cyclable et densité

Cet indicateur mesure la somme totale des segments cyclables situés à l'intérieur des isochrones d'accessibilité pour chaque station. Cette mesure est essentielle car elle fournit une évaluation quantitative de l'infrastructure cyclable disponible autour des points de transport en commun.

Une fois la longueur totale des voies cyclables calculée, elle est rapportée à la superficie totale des zones accessibles pour calculer la densité du réseau cyclable. Cela permet de quantifier l'intensité de l'infrastructure cyclable dans les zones d'accès. Une densité élevée indique une bonne concentration de voies cyclables, ce qui peut être un indicateur de l'efficacité et de l'attractivité de l'infrastructure cyclable à encourager l'utilisation du vélo comme mode de transport vers et depuis les stations.

Des analyses de corrélation vont permettre d'analyser la relation entre la quantité de voies cyclables disponibles et la performance globale de l'accessibilité cyclable.

3.6.5 Ratio longueur réseau cyclable / longueur réseau routier

Cet indicateur est calculé de la façon suivante :

$$\frac{\text{longueur du réseau cyclable}}{\text{longueur du réseau routier}} \quad (3.1)$$

Il permet d'évaluer l'équilibre et l'équité dans le partage de l'espace urbain entre les véhicules motorisés et les cyclistes. Cet indicateur met en lumière la proportion relative des infrastructures désignées pour les cyclistes par rapport à celles disponibles pour l'ensemble de la circulation routière.

Un ratio plus élevé signifie qu'une plus grande partie du réseau routier est accessible aux cyclistes, ce qui peut indiquer une meilleure intégration des infrastructures cyclables et une plus grande

priorité donnée à la mobilité douce dans la planification urbaine. Inversement, un ratio faible pourrait révéler une prédominance des voies routières, ce qui peut limiter la sécurité et le confort des cyclistes, réduisant potentiellement leur accès aux stations de métro et de REM et à d'autres destinations clés.

Cet indicateur est particulièrement utile pour analyser si la quantité de voies cyclables par rapport au réseau routier influence effectivement la performance de l'accessibilité cyclable.

3.6.6 Pourcentage de couverture de la surface maximale théorique

Cet indicateur est une mesure de la performance de l'accessibilité cyclable entre les différentes stations. Il compare la surface des isochrones obtenues à partir des stations à une référence théorique, qui est définie par un cercle parfait tracé à vol d'oiseau (Chekir, 2023). Cette référence est calculée en supposant une mobilité omnidirectionnelle des cyclistes à une vitesse constante de 12 km/h, sans obstacles ni limitations imposées par la trame urbaine. La Figure 3.8 présente le principe du calcul de cet indicateur pour la station De Castelnau, pour le pas de temps 5 minutes.

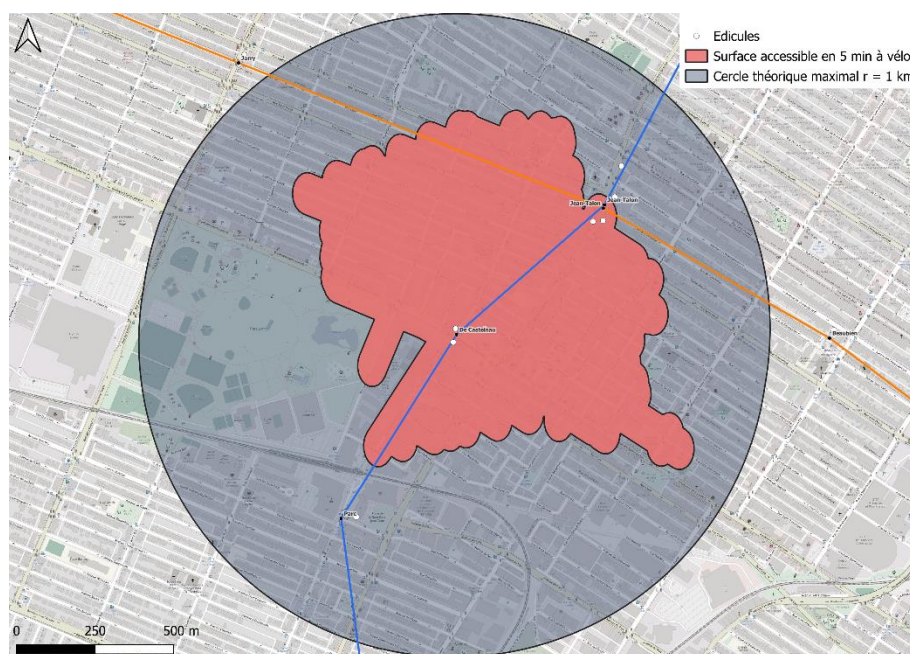


Figure 3.8 Principe de calcul du pourcentage de couverture de la surface maximale théorique

$$PCST = \frac{\text{Surface accessible}}{\text{Surface théorique maximale}} \quad (3.2)$$

Cette mesure permet d'établir un standard uniforme pour évaluer et comparer les performances des différentes stations en termes d'accessibilité.

Pour les stations comportant plusieurs édicules, la surface totale accessible est potentiellement plus grande due à la dispersion des points de départ. Pour ajuster cette mesure et éviter une surévaluation de l'accessibilité, la surface réelle des isochrones est comparée à l'union des cercles théoriques centrés sur chaque édicule. Cela permet d'équilibrer la comparaison en tenant compte de la multiplicité des accès.

Une limite associée à cet indicateur est la proximité de certaines stations avec des obstacles tels que de grands parcs ou le fleuve. Ces zones moins accessibles peuvent fausser l'évaluation de la surface maximale théorique. En effet, indépendamment de la qualité du réseau cyclable, ces espaces ne seront jamais réellement accessibles. Pour pallier ce biais, les indicateurs suivants se concentrent sur la population à l'aide des données de recensement afin de fournir une mesure plus précise de l'accessibilité.

3.6.7 Pourcentage de couverture de la population maximale théorique

Pour évaluer efficacement l'accessibilité cyclable autour des stations de transport en commun, il est pertinent de considérer la population présente dans les isochrones. Une mesure du nombre de personnes résidant à l'intérieur des zones accessibles à vélo, pourrait ainsi refléter la qualité de l'accès cyclable. Une zone qui dessert une population plus importante est souvent vue comme plus attrayante et mieux desservie.

L'indicateur de pourcentage de couverture de la population maximale théorique est conçu pour offrir une mesure plus précise de l'accessibilité cyclable. Il compare la population vivant à l'intérieur des isochrones générées à partir des stations avec celle présente dans le cercle théorique maximal. La Figure 3.9 présente le principe de calcul de cet indicateur.

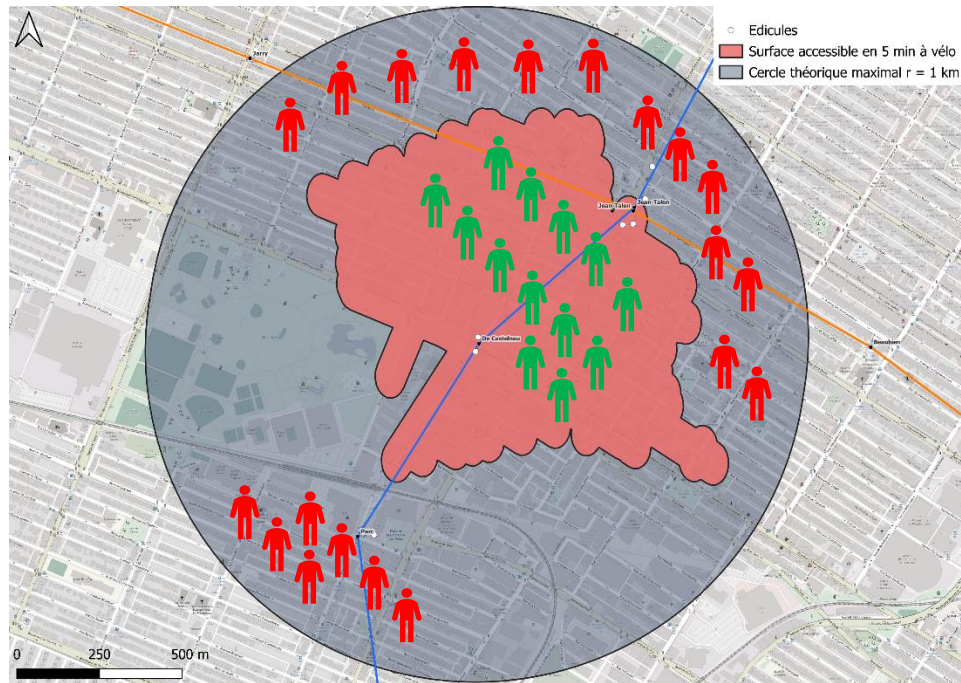


Figure 3.9 Principe de calcul du pourcentage de couverture de la population maximale théorique

$$PCPT = \frac{\text{Population accessible}}{\text{Population théorique maximale}} = \frac{\text{3 green icons}}{\text{3 green icons} + \text{3 red icons}} \quad (3.3)$$

Cette approche permet d'exclure les zones moins attractives ou accessibles et de concentrer l'analyse sur les régions où les améliorations en matière d'infrastructures cyclables pourraient avoir l'impact le plus significatif. En se focalisant sur les endroits où les gens vivent et se déplacent fréquemment, cet indicateur donne une image plus fidèle de l'efficacité des réseaux cyclables dans la facilitation de l'accès aux services et aux opportunités urbaines.

Cependant, une limitation de cet indicateur est sa nature relative. Par exemple, une station qui dessert mal une zone peu peuplée peut paraître inefficace selon cet indicateur, suggérant la nécessité de développements qui pourraient ne pas être justifiés par la densité démographique locale. D'un autre côté, une station située dans un quartier densément peuplé pourrait déjà afficher de bons résultats selon cet indicateur, mais une amélioration de son accessibilité pourrait bénéficier à un grand nombre de personnes. Un dernier indicateur est introduit pour représenter ce potentiel.

3.6.8 Potentiel absolu de population latente

Cet indicateur, exprimée en nombre total de personnes, permet d'évaluer l'impact potentiel des améliorations apportées aux infrastructures cyclables. Cet indicateur mesure le nombre total de personnes qui bénéficieraient d'une amélioration de l'accessibilité cyclable, sans se limiter à des proportions relatives ou des pourcentages. La Figure 3.10 détaille le principe de calcul de cet indicateur.



Figure 3.10 Principe de calcul du potentiel de population latente

$$\text{Potentiel} = \text{Population théorique maximale} - \text{Population accessible} = \text{👤 👤 👤} \quad (3.4)$$

En se concentrant sur le potentiel absolu, cet indicateur prend en compte les variations significatives de densité de population à travers différents quartiers ou zones d'une ville. Cela permet de prioriser les améliorations là où elles peuvent avoir l'impact le plus significatif en termes de nombre d'individus affectés. Par exemple, une petite amélioration dans un quartier densément peuplé peut affecter un grand nombre de personnes, rendant l'investissement particulièrement rentable et justifié. Cette approche aide à identifier où des investissements dans le réseau cyclable pourraient maximiser les avantages pour les résidents et peut aussi permettre de distinguer certains segments de la population.

3.7 Scénarios d'amélioration

Dans cette section, nous abordons l'exploration de différents scénarios d'amélioration structurelle du réseau cyclable, chacun ciblant un aspect différent de l'accessibilité cyclable à Montréal. L'objectif est de simuler des interventions spécifiques sur le réseau cyclable pour évaluer leur impact potentiel sur l'efficacité et l'attractivité de l'accès aux stations de transport en commun. Ces scénarios permettent de comprendre les paramètres qui influencent le plus l'accessibilité des stations relativement à la méthode de calcul des isochrones que nous avons développée.

3.7.1 Extension du réseau cyclable

Dans ce scénario, nous explorons l'impact de l'augmentation du nombre de segments cyclables sur l'accessibilité des stations de transport en commun à Montréal. De nombreux travaux de recherche soulignent une prédominance de l'espace alloué à l'automobile, au détriment des modes de transport plus durables comme le vélo. Face à cette situation, la ville de Montréal a entrepris ces dernières années d'élargir son réseau cyclable, une tendance qui s'inscrit dans une volonté de rééquilibrer l'utilisation de l'espace public.

En plus de comprendre l'effet de l'extension du réseau cyclable sur l'accessibilité, ce scénario vise à examiner si l'extension des infrastructures cyclables contribue systématiquement à améliorer l'accessibilité, ou si certains secteurs sont déjà à un niveau de saturation où de nouvelles additions pourraient avoir peu d'effets bénéfiques. Cela soulève des questions pertinentes : l'ajout de pistes cyclables est-il toujours avantageux ? Existe-t-il des zones où l'accessibilité cyclable a atteint un plateau, rendant inutiles de futurs développements ?

La méthode adoptée ici pour envisager des améliorations du réseau ne se limite pas par des contraintes budgétaires mais propose plutôt un scénario idéalisé où tous les segments routiers, à l'exception des autoroutes, sont adaptés pour être sécuritairement accessibles aux cyclistes. Bien que cette approche puisse sembler extrême et pas nécessairement utile ni réalisable, elle sert de cadre pour établir une limite théorique à l'impact potentiel de l'expansion des infrastructures cyclables sur l'accessibilité. Cette exploration théorique aide à comprendre jusqu'à quel point augmenter le réseau cyclable pourrait influencer positivement l'accessibilité des stations de métro et de REM, tout en fournissant une base pour réfléchir à des stratégies d'amélioration plus réalistes et économiquement viables.

En pratique, nous adoptons une approche visant à recalculer les isochrones pour chaque station du réseau de transport en commun à Montréal, pour chaque intervalle de temps. La principale modification apportée concerne la vitesse de déplacement à vélo, uniformisée à 12 km/h sur tous les segments routiers, à l'exception des autoroutes où la vitesse est fixée à 0 km/h. Cette modification est illustrée dans la Figure 3.11. Cette vitesse de 12 km/h est choisie pour représenter un scénario où les cyclistes peuvent utiliser toutes les voies de manière sécuritaire et efficace, sans les limitations habituelles imposées par les segments moins adaptés aux cyclistes. Les résultats obtenus seront ensuite comparés en utilisant les indicateurs développés dans la section précédente.



Figure 3.11 Principe de répartition des vitesses pour le scénario d'extension du réseau cyclable

3.7.2 Augmentation de la vitesse cyclable

Ce scénario explore l'impact de l'augmentation de la vitesse cyclable uniquement sur les segments cyclables. La réflexion vient du fait que la vitesse cyclable peut varier selon le chemin emprunté. Par exemple à Montréal, le REV est conçu pour offrir une expérience de cyclisme rapide et fluide, avec des aménagements qui permettent de maintenir une vitesse supérieure grâce à des pistes plus larges et des feux de circulation synchronisés à une vitesse cyclable.

L'objectif de ce scénario est de quantifier l'effet d'une vitesse accrue sur les pistes cyclables performantes, comme celles du REV, et de comprendre si de telles infrastructures peuvent significativement améliorer l'accessibilité des stations de transport en commun pour les cyclistes. Cela implique une réévaluation des isochrones autour des stations en utilisant une vitesse ajustée de 16 km/h pour les segments cyclables, tandis que la vitesse sur les segments routiers non cyclables reste inchangée à 5 km/h. Cette méthodologie est illustrée dans la Figure 3.12.

Les résultats de ce scénario seront comparés avec ceux obtenus lors de la situation de référence. Cette comparaison aidera à identifier si l'augmentation de la vitesse sur les pistes cyclables dédiées est une stratégie efficace pour améliorer l'attractivité des stations et encourager une plus grande utilisation du vélo en combinaison avec les transports en commun.

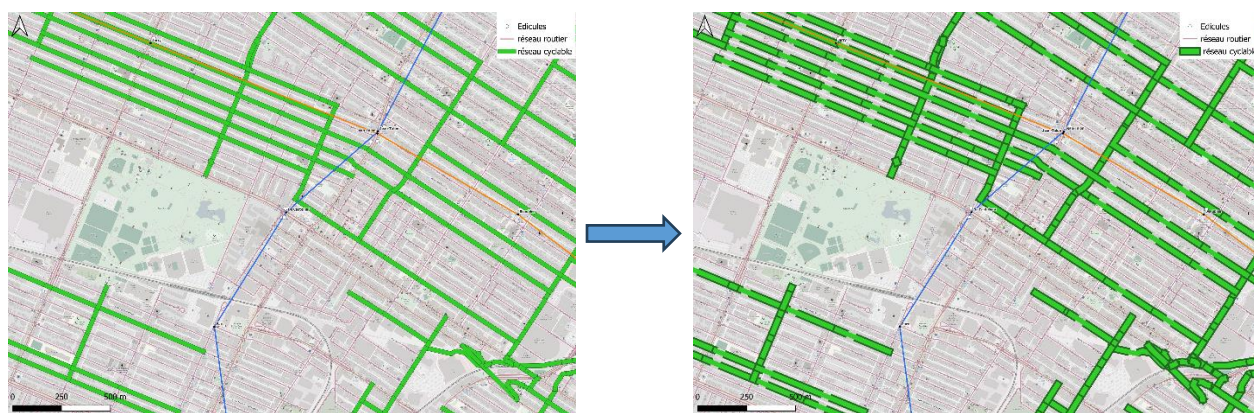


Figure 3.12 Principe de répartition des vitesses pour le scénario d'amélioration de la vitesse cyclable

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET ANALYSE

Dans ce quatrième chapitre, nous analysons les résultats obtenus à la suite de la délimitation des zones d'accessibilité cyclable autour de chaque station de métro et de REM. L'objectif principal est de caractériser les bassins d'attraction pour chaque station. Puis dans un second temps d'analyser l'attractivité potentielle de ces stations pour les usagers des transports en commun, en exploitant les différentes caractérisations des bassins d'accessibilité cyclable que nous avons développées. Nous allons non seulement évaluer ces bassins en termes de superficie et de configuration, mais également analyser l'influence des infrastructures cyclables et routières sur l'accessibilité des stations.

4.1 Bassins d'attraction cyclable autour des stations de transport en commun

Dans cette section, nous présentons les bassins d'attraction cyclable obtenus autour des stations de transport en commun de Montréal. Comme anticipé, ces bassins présentent des formes géométriques variées, influencées par l'emplacement et les caractéristiques spécifiques de chaque station et de la trame urbaine autour de celle-ci. La Figure 4.1 illustre les courbes de niveaux d'accessibilité pour chaque station, à différents intervalles de temps, obtenues grâce à l'utilisation de l'outil d'analyse de réseau de QGIS. Cet outil a permis de générer des itinéraires cyclables et de délimiter des zones selon le temps de trajet estimé.

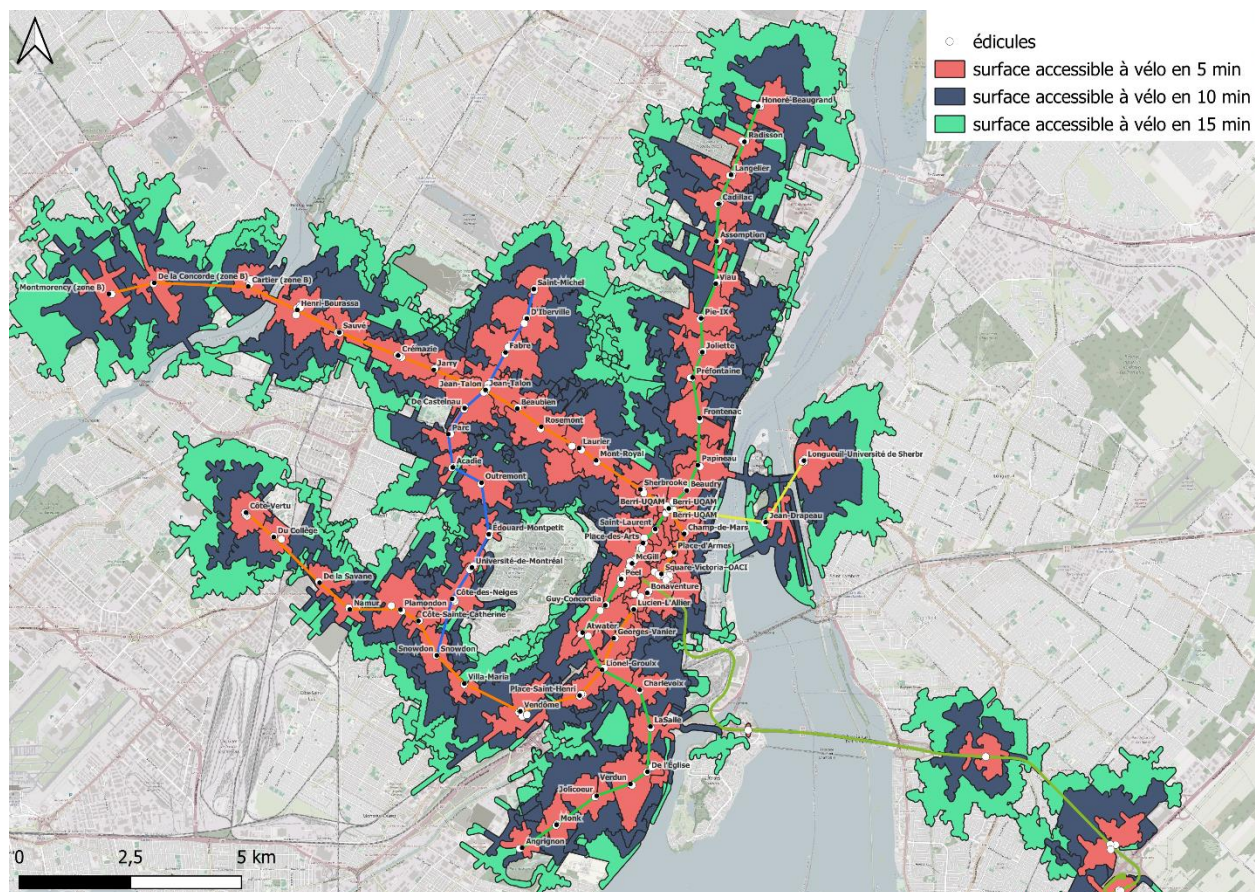


Figure 4.1 Isochrones obtenues pour toutes les stations à différents pas de temps

Les surfaces obtenues révèlent que les zones d'accessibilité ne sont pas uniformes. En fonction de la trame urbaine et du réseau cyclable, les formes et étendues des bassins varient considérablement. De plus, comme présenté en Figure 3.3 on se rend compte que les bassins d'attractions sont bien influencés par la présence de segments cyclables. Ce résultat sera développé dans une analyse de corrélation par la suite.

On remarque que dans les zones où la densité des stations augmente, notamment proche du centre-ville où les stations de transport en commun sont nombreuses et rapprochées, les bassins d'attraction tendent à se superposer. Cette superposition devient plus prononcée à mesure que l'on augmente le pas de temps. Les zones qui se chevauchent de façon importante risquent de voir leurs usages fortement corrélés.

Les résultats concernant trois stations spécifiques—Île des Sœurs, Place d'Armes et Acadie—ne sont pas présentés dans cette analyse en raison de problèmes de connexion avec le réseau routier

et cyclable. Pour la station Île des Sœurs et Place d'Armes, le réseau existant ne permet pas une connexion directe à la station car les points de départ se trouvent trop éloignés du réseau principal, ce qui dépasse les limites de tolérance de l'algorithme utilisé. De même, pour la station Acadie, qui est située à proximité d'une voie ferrée, l'existence d'une passerelle piétonne et cyclable qui permet de franchir la voie n'est pas indiquée dans les données du réseau alors qu'elle existe dans la réalité. Cela conduit à des résultats incorrects pour ces stations.

Pour améliorer ces analyses à l'avenir, il serait possible de corriger manuellement ces défauts dans la couche réseau utilisée par QGIS, en ajoutant les segments manquants. Cette intervention permettrait de garantir que les résultats des analyses d'accessibilité reflètent plus fidèlement la réalité du terrain et la connectivité réelle du réseau cyclable et piétonnier. Ces défis mettent en lumière l'importance de la précision des données utilisées. Ils soulignent le besoin impératif de vérifier et, si nécessaire, de corriger les ensembles de données pour assurer que toutes les connexions et infrastructures, comme les passerelles ou les segments de routes, sont correctement représentées, pour assurer la fiabilité des résultats.

4.1.1 Bassin d'attraction cyclable à l'échelle de tout le réseau de métro

Pour chaque intervalle de temps analysé, nous procédons à un regroupement spatial des zones accessibles. Cette méthode permet de déterminer la surface totale accessible à vélo depuis n'importe quelle station de métro du réseau montréalais, offrant ainsi une perspective globale sur l'accessibilité cyclable à travers l'île. De plus, en intégrant les données du Recensement Canadien, cette analyse est approfondie par l'étude démographique des populations résidant dans chaque bassin d'accessibilité pour différents temps de parcours.

Par exemple, dans la Figure 4.1 pour le pas de temps de 5 minutes, on regroupe toutes les surfaces orange. Cette approche de regroupement permet d'éviter la double comptabilisation des populations dans les zones où les bassins d'accessibilité se chevauchent. Pour chaque zone, la population des ilots de diffusion concernés est comptabilisée. Afin d'augmenter la précision, lorsque des ilots de diffusion se trouvent partiellement dans une isochrone, la population de ces ilots est ajustée proportionnellement à la surface de l'ilot incluse dans l'isochrone. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.1 Part de la population ayant accès au métro à vélo pour différents intervalles

Somme de Population	Île de Montréal	% population totale de l'Île de Montréal	Laval	% population totale de Laval	Longueuil	% population totale de Longueuil
5 min	398476	19,8	9848	2,2	5829	2,3
10 min	799790	39,7	38900	8,9	23591	9,3
15 min	1038534	51,6	67041	15,3	60066	23,6

Sur l'île de Montréal, 39,7% de la population peut atteindre une station de métro en 10 minutes à vélo, et ce chiffre monte à 51,6% pour un trajet de 15 minutes.

Pour Laval et Longueuil, les pourcentages sont significativement plus faibles. Cette différence s'explique principalement par le fait que les stations de métro et du REM ne desservent qu'une partie limitée de ces territoires, réduisant ainsi la proportion de la population qui peut en bénéficier rapidement à vélo.

4.1.2 Comparaison de l'accès au métro à vélo et à pied

Particulièrement dans le cas de Montréal, ces chiffres mettent en lumière l'efficacité du réseau cyclable montréalais en termes d'accessibilité aux infrastructures de transport en commun, soulignant son potentiel à faciliter le report modal du véhicule privé vers le vélo et les transports en commun. Pour comprendre le potentiel du vélo d'augmenter l'accès au transport en commun, on le compare au mode d'accès le plus courant : la marche. Une étude comparative a donc été réalisée entre les isochrones cyclables et les isochrones piétonnières. Cette comparaison vise à souligner les avantages du vélo en termes de couverture spatiale et de temps de parcours par rapport à la marche, une dimension cruciale pour encourager le report modal.

Pour simuler les déplacements piétonniers, une vitesse uniforme de 5 km/h a été appliquée sur l'ensemble du réseau, tant sur les segments cyclables que routiers. Cette vitesse reflète une allure de marche moyenne pour un adulte en bonne santé, permettant ainsi de tracer des isochrones

piétonnières pour évaluer l'accessibilité à pied aux différentes stations de métro. Les résultats de cette étude sont les suivants.

Tableau 4.2 Comparaison des parts de la population ayant accès au métro à vélo et à pied pour différents intervalles

% population totale de l'Île de Montréal accessible	À vélo	À pied
5 min	19,8 %	12,8 %
10 min	39,7 %	28,2 %
15 min	51,6 %	38,7 %

Pour un temps de trajet donné de 10 minutes, le vélo permet d'atteindre 39,7 % de la population de l'Île, comparé à 28,2 %, lorsqu'on se déplace à pied. Cette différence, qui représente environ 230 000 personnes supplémentaires accessibles à vélo, souligne non seulement l'efficacité du vélo comme mode de transport pour accroître l'accès aux stations de métro, mais aussi son potentiel à transformer les habitudes de mobilité urbaine.

4.2 Analyse des différents indicateurs

Dans cette section, nous examinons les performances des différentes stations du réseau de transport en commun en fonction des indicateurs développés précédemment. Les tableaux suivants présentent les résultats des différents indicateurs pour chaque station et pas de temps.

Tableau 4.3 Résultats des différents indicateurs de caractérisation de la géométrie pour chaque station et pas de temps

Ligne	Station	Surface (km ²)			Périmètre (km)			Ratio P/S (km/km ²)		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
REM	Brossard	0,37	1,26	3,83	3,30	10,12	24,65	8,88	8,03	6,43
	Du Quartier	0,99	3,90	7,84	8,19	16,01	31,24	8,30	4,11	3,98
	Panama	0,68	2,56	6,47	6,50	12,48	21,82	9,61	4,87	3,37
Verte	Angrignon	0,33	1,25	3,13	3,73	9,31	16,11	11,43	7,43	5,15
	Monk	0,58	2,58	5,70	4,48	10,37	22,43	7,67	4,01	3,94
	Jolicoeur	0,80	3,80	8,02	5,99	17,38	24,72	7,46	4,58	3,08
	Verdun	1,23	4,03	8,78	7,11	15,67	24,64	5,76	3,89	2,81
	De l'Eglise	1,01	3,52	8,12	6,40	16,73	22,76	6,36	4,75	2,80
	LaSalle	0,55	2,88	6,68	5,61	18,70	34,99	10,22	6,49	5,24
	Charlevoix	0,67	3,29	8,26	5,60	14,87	29,17	8,36	4,52	3,53
	Atwater	0,85	3,21	8,13	5,59	14,54	28,93	6,60	4,53	3,56
	Guy-Concordia	1,17	4,56	10,45	8,08	18,49	31,08	6,92	4,05	2,98
	Peel	1,10	4,69	11,31	7,07	20,94	25,51	6,45	4,46	2,26
	McGill	1,32	5,29	11,87	8,86	21,25	29,12	6,71	4,02	2,45
	Place-des-Arts	1,41	5,73	12,09	10,10	18,78	33,00	7,15	3,27	2,73
	Saint-Laurent	1,28	5,82	11,82	8,68	18,20	31,18	6,79	3,13	2,64
	Beaudry	0,65	3,35	8,50	4,21	14,40	28,47	6,44	4,30	3,35
	Papineau	1,30	4,25	10,30	8,29	19,37	36,75	6,35	4,56	3,57
	Frontenac	0,99	4,10	10,05	6,90	14,74	26,80	6,99	3,59	2,67
	Prefontaine	0,51	2,98	7,89	4,44	13,89	21,09	8,71	4,67	2,67
	Joliette	0,90	4,98	10,51	6,70	18,39	31,20	7,41	3,69	2,97
	Pie-IX	1,10	5,44	11,14	8,36	20,69	34,56	7,62	3,80	3,10
	Viau	0,67	3,48	10,14	7,81	25,01	39,21	11,59	7,18	3,87
	Assomption	0,48	2,97	9,09	6,06	19,91	33,22	12,72	6,71	3,65
	Cadillac	0,77	3,32	7,09	6,53	17,18	32,15	8,52	5,17	4,54
	Langelier	0,69	2,72	6,20	5,57	12,02	25,47	8,04	4,42	4,10
	Radisson	0,49	1,77	5,27	5,07	12,86	24,33	10,41	7,25	4,61
	Honore-Beaugrand	0,70	3,33	8,62	5,86	16,56	30,83	8,37	4,98	3,58
Bleue	Snowdon	0,57	2,44	6,57	4,06	12,98	24,44	7,16	5,32	3,72
	Cote-des-Neiges	0,94	3,02	6,06	7,49	17,12	21,79	8,00	5,66	3,60
	Universite-de-Montreal	0,50	2,17	4,55	5,48	14,76	21,88	10,91	6,80	4,81
	Edouard-Montpetit	0,32	1,48	4,45	4,25	9,73	18,20	13,31	6,59	4,09
	Outremont	0,87	2,82	6,69	6,44	13,42	21,01	7,40	4,76	3,14
	Parc	0,38	1,72	3,84	3,84	8,69	17,83	10,23	5,05	4,64

Tableau 4.3 Résultats des différents indicateurs de caractérisation de la géométrie pour chaque station et pas de temps (suite)

Bleue	De Castelnau	0,94	3,65	9,09	5,64	13,57	28,64	5,97	3,72	3,15
	Jean-Talon	1,46	5,21	11,54	8,09	17,27	31,86	5,56	3,32	2,76
	Fabre	1,15	4,86	11,32	6,95	15,47	26,40	6,04	3,18	2,33
	D'Iberville	1,09	4,83	11,26	6,95	14,32	26,67	6,39	2,96	2,37
	Saint-Michel	0,50	2,77	7,75	3,67	12,39	21,52	7,32	4,48	2,78
Jaune	Jean-Drapeau	0,36	1,38	2,58	5,92	14,17	18,45	16,35	10,28	7,16
	Longueuil-Université	0,74	3,01	6,35	4,86	11,92	18,79	6,56	3,96	2,96
Orange	Cote-Vertu	0,65	2,63	7,33	4,39	16,68	28,00	6,76	6,34	3,82
	Du College	0,50	1,97	5,77	3,64	12,25	28,02	7,23	6,22	4,85
	De la Savane	0,38	1,27	3,62	3,82	10,67	23,20	10,08	8,40	6,41
	Namur	0,35	1,22	3,26	3,42	10,58	14,51	9,70	8,67	4,45
	Plamondon	1,04	3,20	6,65	6,68	15,19	22,19	6,45	4,75	3,34
	Cote-Sainte-Catherine	0,52	2,52	5,46	4,32	11,38	23,27	8,36	4,51	4,26
	Villa-Maria	0,33	2,27	6,51	3,61	13,37	22,77	10,97	5,89	3,50
	Vendome	0,96	3,91	8,53	9,40	17,71	28,33	9,78	4,53	3,32
	Place-Saint-Henri	0,56	2,07	5,33	4,21	9,74	23,85	7,46	4,71	4,47
	Lionel-Groulx	1,02	3,41	8,32	6,16	16,78	26,11	6,06	4,92	3,14
	Georges-Vanier	0,71	3,34	7,75	6,60	12,48	24,16	9,25	3,73	3,12
	Lucien-L'Allier	0,41	2,58	6,63	3,54	10,56	21,21	8,61	4,09	3,20
	Bonaventure	1,20	4,55	9,40	7,73	15,06	26,21	6,43	3,31	2,79
	Square-Victoria OACI	1,30	4,45	9,18	8,36	17,17	27,95	6,42	3,86	3,04
	Place-d'Armes	1,29	5,09	10,09	8,83	17,11	27,71	6,87	3,36	2,75
	Berri-UQAM	1,83	6,57	12,81	10,12	20,25	34,90	5,52	3,08	2,72
	Sherbrooke	1,06	5,36	12,12	7,67	20,71	30,17	7,22	3,86	2,49
	Mont-Royal	0,70	4,55	10,93	4,99	16,40	25,65	7,18	3,61	2,35
	Laurier	1,62	6,58	13,80	9,89	18,85	30,96	6,11	2,86	2,24
	Rosemont	1,15	6,01	13,87	8,39	19,61	32,54	7,29	3,26	2,35
	Beaubien	1,33	6,02	14,04	8,44	20,48	29,69	6,37	3,40	2,11
	Jarry	1,12	4,25	9,60	6,53	14,65	28,39	5,84	3,45	2,96
	Cremazie	0,95	3,36	8,86	5,74	14,80	27,69	6,06	4,40	3,13
	Sauve	1,07	4,67	10,97	7,88	21,05	31,80	7,36	4,51	2,90
	Henri-Bourassa	1,21	4,85	9,51	9,32	19,95	36,43	7,70	4,11	3,83
	Cartier	0,44	1,97	5,11	3,54	10,74	23,22	8,08	5,46	4,54
	De la Concorde	0,73	4,12	10,35	7,67	21,76	33,82	10,52	5,28	3,27
	Montmorency	0,69	3,61	9,89	6,30	20,60	35,53	9,07	5,71	3,59

Tableau 4.4 Résultats des différents indicateurs de caractérisation des réseaux pour chaque station et pas de temps

Ligne	Station	Longueur réseau routier (km)			Densité du réseau routier (km/km ²)			Longueur réseau cyclable (km)			Densité du réseau cyclable (km/km ²)		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
REM	Brossard	20,37	70,23	167,21	54,87	55,76	43,65	0,97	4,28	14,51	2,61	3,40	3,79
	Du Quartier	52,75	169,09	292,31	53,50	43,37	37,27	7,75	19,98	29,02	7,86	5,13	3,70
	Panama	35,50	113,56	238,75	52,44	44,35	36,90	2,93	8,06	20,41	4,33	3,15	3,15
Verte	Angrignon	5,53	21,05	48,89	16,94	16,79	15,63	0,62	1,98	7,34	1,90	1,58	2,35
	Monk	9,81	44,79	90,19	16,78	17,33	15,83	1,28	7,80	23,05	2,19	3,02	4,05
	Jolicoeur	14,57	63,62	126,08	18,17	16,75	15,71	3,46	16,66	33,55	4,32	4,39	4,18
	Verdun	19,93	64,93	126,08	16,15	16,10	14,36	5,70	18,71	40,93	4,62	4,64	4,66
	De l'Eglise	15,77	57,42	117,90	15,67	16,31	14,52	4,63	15,73	36,50	4,60	4,47	4,50
	LaSalle	8,81	42,05	96,09	16,04	14,59	14,38	3,13	15,68	35,42	5,70	5,44	5,30
	Charlevoix	10,56	51,64	118,11	15,75	15,71	14,29	4,54	18,88	40,23	6,77	5,74	4,87
	Atwater	15,26	54,78	136,88	18,00	17,07	16,83	1,98	7,80	25,12	2,33	2,43	3,09
	Guy-Concordia	20,42	78,97	178,16	17,48	17,30	17,06	3,73	13,29	39,70	3,19	2,91	3,80
	Peel	20,50	83,36	205,11	18,70	17,77	18,14	3,38	17,32	48,94	3,08	3,69	4,33
	McGill	24,78	97,47	224,11	18,78	18,43	18,88	5,49	22,08	55,06	4,16	4,18	4,64
	Place-des-Arts	26,82	113,54	231,31	19,00	19,80	19,13	7,18	28,05	59,96	5,08	4,89	4,96
	Saint-Laurent	25,68	117,90	227,37	20,08	20,27	19,24	6,96	29,99	59,72	5,44	5,16	5,05
	Beaudry	14,31	69,61	167,13	21,88	20,81	19,66	3,00	15,16	40,74	4,59	4,53	4,79
	Papineau	26,57	82,22	188,38	20,37	19,34	18,30	7,67	18,05	46,96	5,88	4,25	4,56
	Frontenac	18,53	68,95	172,06	18,77	16,81	17,12	4,80	18,96	50,20	4,86	4,62	4,99
	Prefontaine	7,60	49,70	129,06	14,90	16,71	16,35	1,29	12,98	39,01	2,52	4,36	4,94
	Joliette	14,48	85,64	171,37	16,01	17,19	16,30	5,30	26,84	55,39	5,86	5,39	5,27
	Pie-IX	19,12	85,66	170,64	17,41	15,74	15,32	8,41	31,88	56,93	7,66	5,86	5,11
	Viau	11,77	56,46	150,24	17,46	16,21	14,81	6,34	25,52	55,62	9,41	7,33	5,48
	Assomption	7,54	44,21	130,79	15,84	14,91	14,39	2,35	15,77	43,13	4,94	5,32	4,74
	Cadillac	13,73	55,98	112,97	17,91	16,85	15,94	3,25	11,92	28,35	4,24	3,59	4,00
	Langelier	13,35	47,97	101,41	19,26	17,66	16,34	2,26	10,47	22,45	3,25	3,85	3,62
	Radisson	8,52	30,75	85,76	17,48	17,33	16,26	1,80	5,82	19,03	3,69	3,28	3,61
	Honore-Beaugrand	13,98	62,63	149,43	19,98	18,83	17,34	2,77	15,48	39,57	3,96	4,65	4,59
Bleue	Snowdon	10,47	40,37	102,38	18,47	16,54	15,59	1,57	8,67	21,34	2,77	3,55	3,25
	Cote-des-Neiges	15,11	47,02	88,42	16,13	15,55	14,60	5,29	11,78	16,92	5,65	3,89	2,79
	Universite-de-Montreal	8,16	31,58	66,46	16,24	14,54	14,62	2,51	7,01	13,69	5,00	3,23	3,01
	Edouard-Montpetit	4,87	21,36	69,09	15,25	14,47	15,53	0,87	4,31	16,77	2,73	2,92	3,77
	Outremont	14,83	44,46	110,71	17,04	15,76	16,55	5,01	11,22	30,49	5,76	3,98	4,56

Couleur	Nom	2017						2018						2019	
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8
Bleue	Parc	6,93	33,18	72,15	18,44	19,28	18,78	0,67	4,68	16,93	1,78	2,72	4,41		
	De Castelnau	18,16	65,19	157,59	19,22	17,86	17,34	6,82	25,36	54,52	7,22	6,95	6,00		
	Jean-Talon	26,31	90,80	199,58	18,07	17,43	17,30	11,90	35,92	68,32	8,18	6,89	5,92		
	Fabre	18,82	79,54	193,85	16,34	16,36	17,12	7,35	29,59	66,45	6,38	6,09	5,87		
	D'Iberville	18,77	81,60	189,72	17,26	16,90	16,84	6,56	27,12	61,75	6,03	5,61	5,48		
	Saint-Michel	9,50	51,52	133,70	18,93	18,61	17,25	1,79	11,88	37,43	3,57	4,29	4,83		
Jaune	Jean-Drapeau	8,53	32,43	44,96	23,57	23,53	17,45	5,37	15,54	23,91	14,85	11,27	9,28		
	Longueuil-Université														
Orange		53,28	131,44	229,15	71,88	43,65	36,08	4,38	17,42	27,36	5,91	5,78	4,31		
	Cote-Vertu	13,69	48,11	125,91	21,10	18,29	17,18	2,55	11,84	30,59	3,92	4,50	4,18		
	Du College	8,83	36,01	100,54	17,55	18,27	17,41	0,88	6,44	21,55	1,75	3,27	3,73		
	De la Savane	6,53	18,97	51,71	17,23	14,93	14,27	0,85	2,27	10,13	2,25	1,79	2,80		
	Namur	5,50	18,48	45,62	15,60	15,15	14,00	0,00	2,11	6,87	0,00	1,73	2,11		
	Plamondon	16,42	49,25	101,37	15,86	15,40	15,24	5,32	12,18	16,68	5,14	3,81	2,51		
	Cote-Sainte-Catherine	8,61	39,59	85,48	16,67	15,70	15,65	2,08	10,53	18,06	4,03	4,18	3,31		
	Villa-Maria	5,36	36,71	100,43	16,32	16,16	15,44	0,58	8,50	20,14	1,77	3,74	3,10		
	Vendome	17,19	60,10	133,32	17,89	15,37	15,63	4,50	13,61	25,46	4,68	3,48	2,99		
	Place-Saint-Henri	10,37	37,74	88,22	18,38	18,25	16,55	1,39	7,31	22,35	2,46	3,54	4,19		
	Lionel-Groulx	19,30	59,26	134,91	19,00	17,37	16,22	5,07	15,22	36,32	4,99	4,46	4,37		
	Georges-Vanier	14,25	58,47	132,05	19,99	17,48	17,04	3,46	12,71	30,51	4,85	3,80	3,94		
	Lucien-L'Allier	7,26	45,73	116,18	17,67	17,70	17,53	0,76	10,29	27,63	1,86	3,98	4,17		
	Bonaventure	23,77	86,25	171,64	19,78	18,96	18,26	3,77	19,43	39,21	3,14	4,27	4,17		
	Square-Victoria														
	OACI	28,38	87,81	172,20	21,77	19,73	18,75	5,86	20,91	44,61	4,50	4,70	4,86		
	Place-d'Armes	27,67	104,81	191,21	21,53	20,61	18,94	6,14	23,41	51,29	4,78	4,60	5,08		
	Berri-UQAM	40,04	134,40	244,94	21,83	20,47	19,11	8,92	32,68	65,83	4,86	4,98	5,14		
	Sherbrooke	22,99	111,00	233,18	21,64	20,70	19,24	7,76	34,00	69,96	7,31	6,34	5,77		
	Mont-Royal	16,13	92,73	198,75	23,19	20,40	18,19	4,62	38,55	76,06	6,64	8,48	6,96		
	Laurier	34,60	126,34	245,83	21,37	19,20	17,81	13,65	51,81	93,11	8,43	7,87	6,75		
	Rosemont	20,85	105,95	247,44	18,10	17,62	17,85	10,38	44,44	95,90	9,01	7,39	6,92		
	Beaubien	22,42	101,70	246,72	16,91	16,89	17,57	11,35	43,66	92,72	8,56	7,25	6,60		
	Jarry	20,85	79,20	161,20	18,65	18,63	16,78	10,55	25,91	48,47	9,44	6,10	5,05		
	Cremazie	17,49	61,55	147,02	18,47	18,31	16,60	6,82	19,57	43,83	7,20	5,82	4,95		
	Sauve	18,16	76,76	170,81	16,97	16,45	15,57	6,55	25,37	49,59	6,12	5,44	4,52		
	Henri-Bourassa	20,25	77,69	151,81	16,71	16,01	15,97	8,05	26,44	43,64	6,65	5,45	4,59		
	Cartier	8,04	30,66	81,27	18,33	15,58	15,90	0,94	8,70	21,14	2,15	4,42	4,13		
	De la Concorde	10,51	62,61	147,97	14,42	15,20	14,30	10,69	34,55	67,02	14,66	8,39	6,48		
	Montmorency	11,74	59,51	138,33	16,89	16,49	13,99	7,89	30,11	67,08	11,35	8,34	6,79		

Tableau 4.5 Résultats des différents indicateurs de mesure de la performance pour chaque station et pas de temps

Ligne	Station	PCST (%)			PCPT (%)			Potentiel de nouvelle population		
		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
REM	Brossard	11,43	10,02	13,39	5,33	13,49	15,84	1215	7134	25831
	Du Quartier	27,92	29,69	26,64	28,14	26,21	32,45	2005	13360	29990
	Panama	21,55	20,71	22,88	12,74	18,70	23,74	7932	34720	70027
Verte	Angrignon	10,38	10,14	11,06	22,84	20,89	18,75	12618	45588	111332
	Monk	18,16	20,64	19,98	21,09	34,25	30,73	20099	45434	96552
	Jolicoeur	25,53	30,71	28,37	18,49	42,81	47,67	24544	46832	76047
	Verdun	38,66	32,35	30,89	53,11	52,02	48,91	15401	38462	72786
	De l'Eglise	29,11	27,11	27,78	43,12	45,30	45,83	17184	45282	77321
	LaSalle	17,47	23,31	23,63	25,12	29,77	30,02	14144	54852	122982
	Charlevoix	21,33	26,58	29,22	23,29	28,64	35,36	18124	64481	118926
	Atwater	24,35	24,60	27,76	38,98	40,36	45,14	24295	59148	102712
	Guy-Concordia	33,27	34,86	35,54	50,73	54,09	55,10	20980	49468	88349
	Peel	31,06	35,73	38,41	31,10	53,31	61,30	27715	51842	80246
	McGill	36,84	39,97	40,14	39,17	52,25	64,09	21352	57417	76652
	Place-des-Arts	38,05	42,52	40,36	41,36	53,25	63,40	20704	57534	80396
	Saint-Laurent	40,71	47,04	41,79	39,78	59,99	62,11	20882	40957	79799
	Beaudry	20,81	27,06	30,06	28,27	35,26	44,45	21235	61193	106651
	Papineau	41,53	34,38	36,41	44,73	44,86	51,51	13931	46013	92784
	Frontenac	31,41	33,17	35,54	39,41	40,40	47,03	15509	57257	114102
	Prefontaine	15,93	23,84	27,74	15,71	28,84	37,56	26103	79515	130991
	Joliette	28,28	39,94	36,96	31,90	52,98	55,74	24651	47745	81953
	Pie-IX	34,08	43,48	39,06	39,94	55,42	50,63	16529	41364	93706
	Viau	21,46	28,17	35,87	34,60	36,06	48,50	8173	48356	85038
	Assomption	15,15	23,98	32,14	11,99	29,56	33,97	11525	42694	106547
	Cadillac	23,63	26,44	24,79	30,32	39,71	27,28	15086	34667	108197
	Langelier	21,02	21,44	21,59	21,80	33,52	27,69	15945	40586	101062
	Radisson	14,64	13,94	18,29	10,01	12,79	20,81	12689	61854	115256
	Honore-Beaugrand	20,41	25,73	29,58	20,10	25,14	41,85	12861	58888	75403
Bleue	Snowdon	18,04	19,74	23,22	17,01	27,03	35,88	26808	77986	128544
	Cote-des-Neiges	28,71	24,00	21,15	33,40	36,52	36,52	21578	65268	119996
	Universite-de-Montreal	14,82	16,88	15,66	17,19	24,46	24,14	19515	67673	162888
	Edouard-Montpetit	9,79	11,71	15,53	13,76	9,65	17,99	13338	79327	186246

Tableau 4.5 Résultats des différents indicateurs de mesure de la performance pour chaque station et pas de temps (suite)

Bleue	Outremont	27,70	22,82	23,65	29,95	22,81	27,11	19452	81379	171245
	Parc	11,96	13,92	13,58	19,69	20,92	19,56	24442	95277	192858
	De Castelnau	29,24	29,11	31,85	35,17	32,76	41,68	22906	91045	148796
	Jean-Talon	40,91	39,51	39,08	42,22	44,66	47,34	25624	80051	145962
	Fabre	33,10	37,30	38,65	37,63	44,16	44,09	26944	74296	156587
	D'Iberville	31,86	37,43	38,72	28,21	44,08	45,60	26775	67170	143419
	Saint-Michel	15,53	22,07	27,14	16,45	23,18	29,64	24126	84308	178221
Jaune	Jean-Drapeau	11,52	11,15	9,11	0,00	0,00	0,06	80	22445	99099
	Longueuil-Université	22,25	23,64	22,02	49,96	38,94	23,78	3824	16979	76860
Orange	Cote-Vertu	19,49	20,65	25,41	18,02	22,14	31,80	17180	58443	96743
	Du College	14,31	15,04	19,64	19,43	15,48	20,82	10637	50303	111308
	De la Savane	12,06	10,28	12,81	13,22	14,82	15,78	8603	41511	125068
	Namur	11,23	9,86	11,52	11,64	12,52	16,28	15919	58825	136061
	Plamondon	28,25	23,86	22,28	36,49	41,91	40,16	28073	59310	110181
	Cote-Sainte-Catherine	16,44	20,39	19,32	23,18	32,31	34,84	30580	71936	121593
	Villa-Maria	10,46	18,37	23,01	12,29	22,51	28,03	23753	74635	138409
	Vendome	26,59	29,41	28,74	30,12	38,24	36,66	15451	50494	133396
	Place-Saint-Henri	17,00	16,27	18,50	25,11	19,84	21,96	17949	77006	159942
	Lionel-Groulx	32,33	27,59	29,42	33,15	30,24	45,32	20216	73131	101727
	Georges-Vanier	22,69	27,06	27,41	22,43	42,52	49,56	31954	60940	87050
	Lucien-L'Allier	13,08	20,90	23,44	13,33	33,97	43,27	36735	69968	100488
	Bonaventure	28,23	31,27	29,77	23,00	42,01	53,42	37428	65281	89345
	Square-Victoria OACI	32,76	31,77	29,87	29,11	36,02	50,21	24147	69367	92962
	Place-d'Armes	38,42	39,83	34,94	37,52	50,83	58,12	15063	48973	77342
	Berri-UQAM	47,24	47,55	42,09	47,49	63,46	62,25	22075	39820	81801
	Sherbrooke	32,41	42,44	42,25	33,61	52,32	57,77	26841	60393	96908
	Mont-Royal	22,14	36,77	38,64	22,72	42,76	49,59	33302	79231	134353
	Laurier	45,06	49,63	46,58	45,32	56,92	54,01	25511	63371	135614
	Rosemont	36,66	48,64	49,03	35,69	49,13	57,57	22347	71970	122765
	Beaubien	42,20	48,70	49,66	45,98	49,26	58,82	18248	73261	118127
	Jarry	35,58	34,38	33,96	51,96	42,32	43,98	15727	68552	125424
	Cremazie	28,13	26,25	30,59	40,51	36,31	36,72	15994	61944	135075
	Sauve	33,13	37,21	38,43	41,17	45,47	43,33	11352	38716	97631
	Henri-Bourassa	33,45	36,46	32,01	35,31	47,74	37,59	12945	34412	100937
	Cartier	12,99	15,34	17,64	15,45	16,77	19,88	11338	47902	110079
	De la Concorde	23,21	33,31	36,59	26,14	49,35	46,01	14711	25129	54570
	Montmorency	22,12	29,19	34,96	20,70	25,91	33,91	9622	34661	67715

4.2.1 Surface

Les résultats détaillent les surfaces des zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Les stations situées dans le Plateau Mont Royal, telles que Laurier, Beaubien, Berry et Rosemont, montrent les surfaces accessibles les plus étendues. À l'opposé, les stations comme Jean Drapeau, Angrignon, Namur et De La Savane présentent les plus petites surfaces accessibles, un phénomène qui peut s'expliquer par des déficiences en aménagements cyclables ou la proximité d'obstacles tels que des autoroutes, des parcs ou des voies ferrées.

Il est également observé que certaines stations, comme Viau, De la Concorde, Joliette et Du Collège, présentent au premier pas de temps une faible surface accessible qui s'élargit notablement à mesure que le pas de temps augmente, relativement aux autres stations. Cela suggère que ces stations sont entourées de voies cyclables, bien que celles-ci ne les desservent pas directement. Inversement, des stations comme Verdun affichent de bons scores initiaux, qui se dégradent avec l'augmentation du temps.

4.2.2 Périmètre

Les résultats détaillent les périmètres des zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

L'analyse des périmètres des zones d'accessibilité autour des stations de métro révèle des tendances intéressantes. Les stations telles que Viau, Henri Bourassa et Berry affichent les plus grands périmètres, tandis que Namur, Angrignon et Parc présentent les périmètres les plus restreints. Cette observation suggère généralement une corrélation entre la superficie des bassins d'accessibilité et leur périmètre, avec des zones plus étendues ayant naturellement des périmètres plus importants.

Cependant, des anomalies comme la station Viau montrent un grand périmètre malgré une superficie relativement modeste. Cette particularité souligne l'utilité de l'indicateur Périmètre/Surface, qui aide à identifier les stations dont les zones d'accessibilité présentent des formes irrégulières ou fragmentées.

Quand nous examinons le rapport périmètre/surface, nous observons que les stations avec les rapports les plus élevés sont Jean Drapeau, Namur, De La Savane, Édouard-Montpetit, Angrignon

et Brossard. On relève que ces stations sont également celles qui présentaient des performances moins satisfaisantes dans l'indicateur précédent.

Cela montre que certaines stations, tout en ayant des surfaces d'accessibilité réduites, présentent des périmètres relativement importants. Ce phénomène peut indiquer des formes irrégulières ou étendues des bassins d'accessibilité, ce qui peut suggérer une complexité accrue dans l'aménagement des itinéraires cyclables environnants. Ces caractéristiques peuvent influencer négativement la facilité d'accès cyclable aux stations.

4.2.3 Longueur du réseau routier et densité

Les résultats détaillent la longueur du réseau routier dans les zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Certaines stations, telles que Du Quartier, Longueuil et Panama, présentent des longueurs de réseau routier exceptionnellement élevées. Ces anomalies sont dues à des différences dans les sources de données utilisées pour ces zones spécifiques, ce qui affecte la comparabilité pour cet indicateur. En conséquence, ces stations sont exclues de l'analyse principale pour maintenir la cohérence des données.

Pour les autres stations, celles affichant les plus grandes longueurs de réseau routier incluent Berry, Laurier, Rosemont, Place des Arts et Saint Laurent, correspondant également aux zones ayant des surfaces d'accessibilité les plus étendues. Ces stations comptaient les surfaces les plus grandes donc ces résultats semblent logiques.

À l'opposé, les stations comme Namur, Angrignon, De la Savane et Jean Drapeau montrent les plus faibles longueurs de réseau routier, ce qui est cohérent avec leurs surfaces d'accessibilité relativement réduites.

Pour affiner cette analyse, on s'intéresse aux calculs de la densité de réseau routier dans les zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps. Ce calcul permettra de mieux comprendre les variations de densité routière et leur impact sur l'accessibilité cyclable aux stations de métro.

On retrouve des anomalies notables pour les stations de Brossard, Longueuil, Du Quartier et Panama. À cause de ces irrégularités dues à des sources de données hétérogènes, ces stations sont exclues de l'analyse pour assurer la fiabilité des résultats.

Pour les stations restantes, l'analyse met en évidence une distinction claire en termes de densité de réseau routier. Les stations situées dans le centre-ville et dans le quartier du Plateau Mont Royal affichent les densités les plus élevées. À l'inverse, les stations situées à l'ouest de la ligne orange, caractérisées par un développement urbain moins dense, montrent des densités de réseau routier nettement plus faibles.

Ces observations seront exploitées pour mener des analyses de corrélation approfondies visant à évaluer l'impact de la densité du réseau routier sur la performance de l'accessibilité cyclable aux stations.

4.2.4 Longueur du réseau cyclable et densité

Les résultats détaillent la longueur du réseau cyclable dans les zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

On retrouve des tendances similaires aux indicateurs précédents. Les stations situées dans le quartier du Plateau Mont Royal se distinguent par des longueurs de réseau cyclable particulièrement élevées. À l'opposé, les stations de Brossard, Namur, De la Savane et Angrignon présentent des longueurs de réseau cyclable nettement inférieures. La longueur de piste cyclable est probablement proportionnelle à la superficie de l'isochrone, ce qui suggère que des analyses de densité de réseau cyclable pourraient offrir une perspective moins biaisée.

Un constat que l'on peut néanmoins faire est que, pour les stations Namur, et Angrignon, on constate une absence totale de voies cyclables dans leurs isochrones, pour un intervalle de 5 ou 10 minutes. Cela signifie qu'aucune infrastructure cyclable n'est accessible à moins de 833 mètres de ces stations, calculés sur la base d'une marche à 5 km/h. Cette absence met en évidence des zones critiques où l'amélioration du réseau cyclable pourrait considérablement augmenter l'accessibilité et encourager l'utilisation combinée du vélo et des transports en commun.

Les résultats détaillent la densité du réseau cyclable dans les zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Les stations de Laval, De la Concorde et Montmorency, affichent les densités les plus élevées, suivies par les stations situées dans le quartier du Plateau Mont Royal. Le cas de Jean Drapeau est spécial car cette station est située sur une île dans une zone dédiée aux activités culturelles et dépourvue de logements. À l'opposé, les stations de Namur, Angrignon et De La Savane montrent

des densités de voies cyclables particulièrement faibles, ce qui est cohérent avec les autres indicateurs précédemment analysés.

Il est également important de noter que les valeurs de densité restent relativement stables entre les intervalles de 10 et 15 minutes pour chaque station, mais divergent significativement à 5 minutes. La surface couverte est plus réduite et ne reflète pas toujours adéquatement l'environnement cyclable entourant les stations, indiquant que les mesures à des intervalles plus courts pourraient ne pas fournir une image précise de l'accessibilité cyclable avec cette méthodologie.

4.2.5 Ratio longueur réseau cyclable / longueur réseau routier

Les résultats détaillent les ratio longueur réseau cyclable / longueur réseau routier dans les zones d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Ce ratio, qui offre un aperçu de l'équilibre entre les infrastructures cyclables et routières, varie généralement entre 10 % et 50 % pour la majorité des stations.

Les stations de Laval, notamment De La Concorde et Montmorency, ainsi que Viau et plusieurs stations du Plateau Mont Royal, affichent les ratios les plus élevés, souvent supérieurs à 40 %. Notamment, à De La Concorde pour un pas de temps de 5 minutes, le ratio dépasse même les 100%, ce qui signifie qu'il y a plus de segments cyclables (partagés et en site propre), que de segments routiers non cyclables. En revanche, les stations telles que Du Quartier, Angrignon et Namur présentent toujours les ratios les plus faibles, souvent inférieurs à 10 %.

Des analyses de corrélation seront réalisées pour évaluer si le niveau de ce ratio influence directement la performance de l'accessibilité des stations.

4.2.6 Pourcentage de couverture de la surface théorique (PCST)

Les résultats détaillent les valeurs obtenues pour le PCST pour chaque zone d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Tout d'abord, dans l'analyse du PCST, nous constatons qu'aucune des stations n'atteint 100% de couverture. Cette observation peut être expliquée par la configuration de la trame urbaine, majoritairement orthogonale à Montréal. Théoriquement, si l'on considère que les isochrones prennent la forme d'un carré parfaitement inscrit dans un cercle de rayon équivalent à la distance maximale accessible à vélo, la surface maximale théoriquement accessible ne pourrait représenter

que 63% de la surface du cercle. Ce calcul provient du fait que la surface d'un carré inscrit dans un cercle correspond à $\frac{2}{\pi}$ fois la surface du cercle, soit environ 63%.

Bien que les zones tampon autour des isochrones puissent légèrement augmenter cette surface au-delà de celle du carré inscrit, et que les rues ne soient pas toujours parfaitement orthogonales, ces ajustements ne suffisent généralement pas pour approcher significativement de 100% de couverture dans le cas où la population est uniformément répartie.

Pour illustrer les variations de performance entre les stations, une représentation cartographique des résultats est utilisée. Sur la carte de la zone étudiée, chaque station est marquée d'une pastille colorée : rouge pour les taux de couverture les plus faibles et verte pour les plus élevés. Cette carte met en évidence les valeurs du PCST pour chaque station au pas de temps 10 minutes.

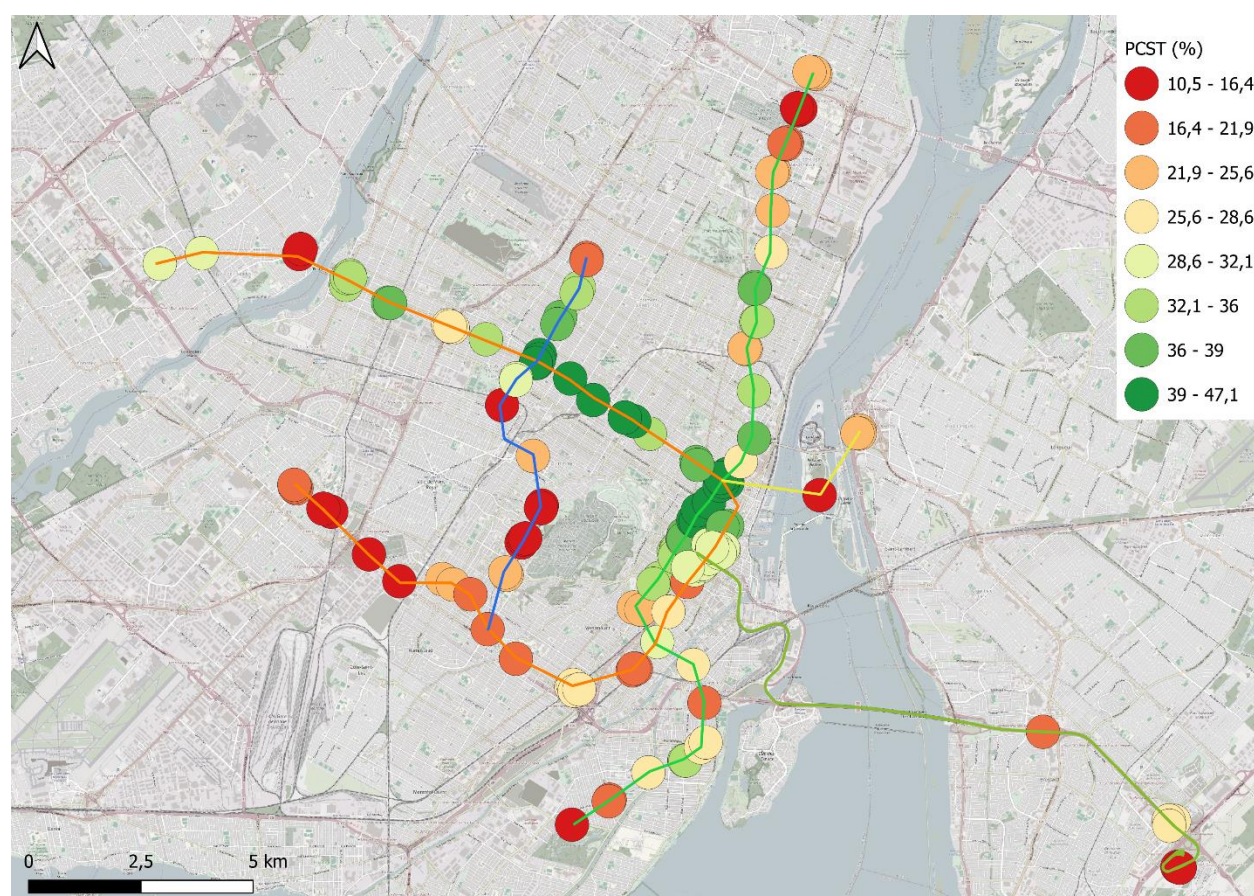


Figure 4.2 Représentation spatiale des PCST au pas de temps 10 minutes pour chaque station

Les meilleures performances sont obtenues au niveau des stations situées dans le Plateau et le centre-ville. En revanche, les stations à l'ouest de la ligne orange, celles de la ligne bleue ainsi que les terminus de la ligne verte montrent des résultats moins favorables.

4.2.7 Pourcentage de couverture de population théorique (PCPT)

Les résultats détaillent les valeurs obtenues pour le PCPT pour chaque zone d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps.

Pour illustrer les variations de performance entre les stations, une représentation cartographique des résultats est utilisée. Sur la carte de la zone étudiée, chaque station est marquée d'une pastille colorée : rouge pour les taux de couverture les plus faibles et verte pour ceux plus élevés. Cette carte met en évidence les valeurs du PCPT pour chaque station au pas de temps 10 minutes.

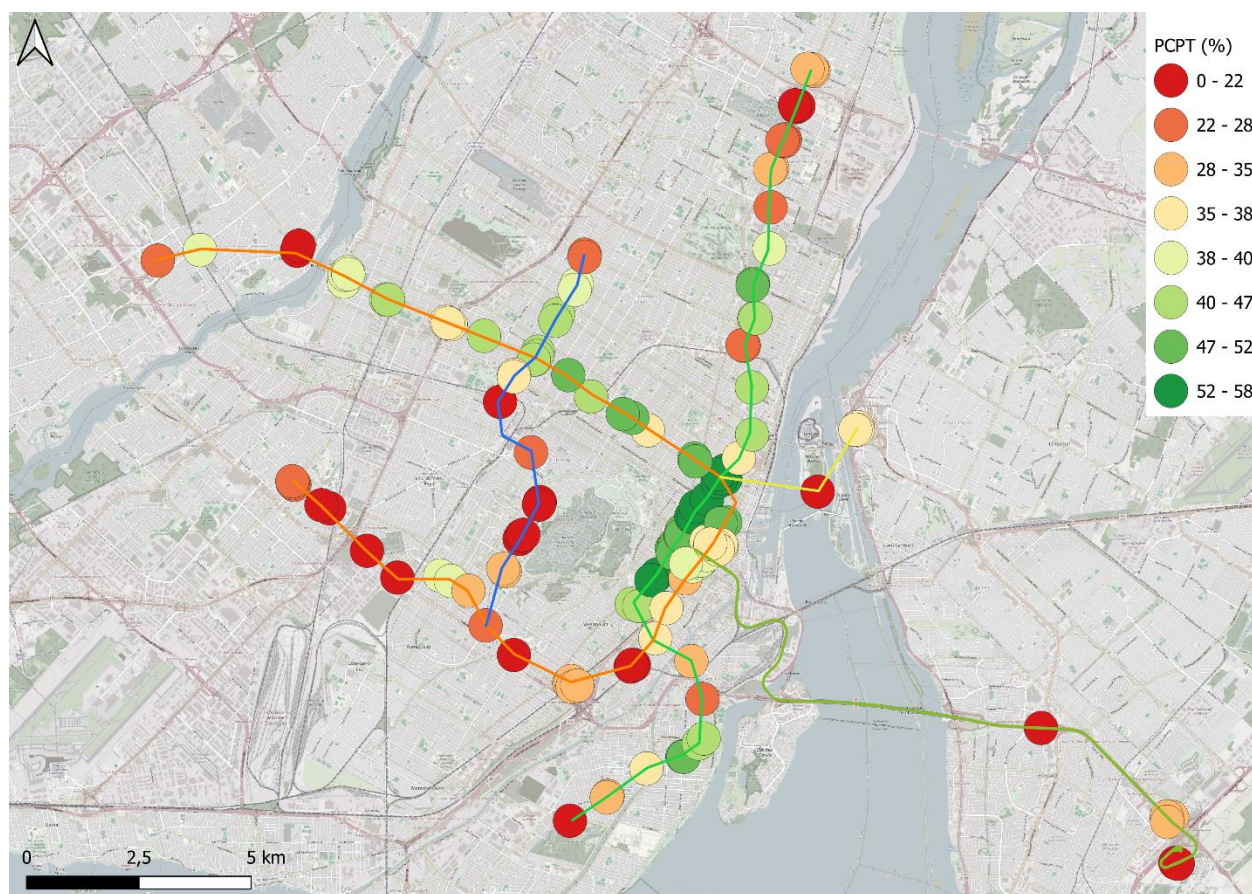


Figure 4.3 Représentation spatiale des PCPT au pas de temps 10 minutes pour chaque station

Les résultats montrent que, bien que certains ajustements puissent être observés par rapport à l'indicateur précédent de Pourcentage de couverture de la surface théorique (PCST), les tendances générales restent similaires. Les stations bien connectées et situées dans des zones densément peuplées tendent à afficher de meilleurs taux de PCPT.

4.2.8 Potentiel absolu de population latente

Les résultats détaillent les valeurs obtenues pour le potentiel de population latente pour chaque zone d'accessibilité cyclable des stations de métro pour différents intervalles de temps. Cet indicateur calcule le nombre de personnes résidant dans le cercle maximal théorique de chaque station pour chaque pas de temps, mais qui ne sont pas couvertes par les isochrones correspondantes.

La Figure 4.4 présente les résultats pour le pas de temps 10 minutes. Chaque station est indiquée par une pastille colorée : les pastilles vertes signalent un potentiel latent faible, tandis que les rouges

indiquent un potentiel élevé, suggérant un besoin significatif d'amélioration de l'accessibilité cyclable.

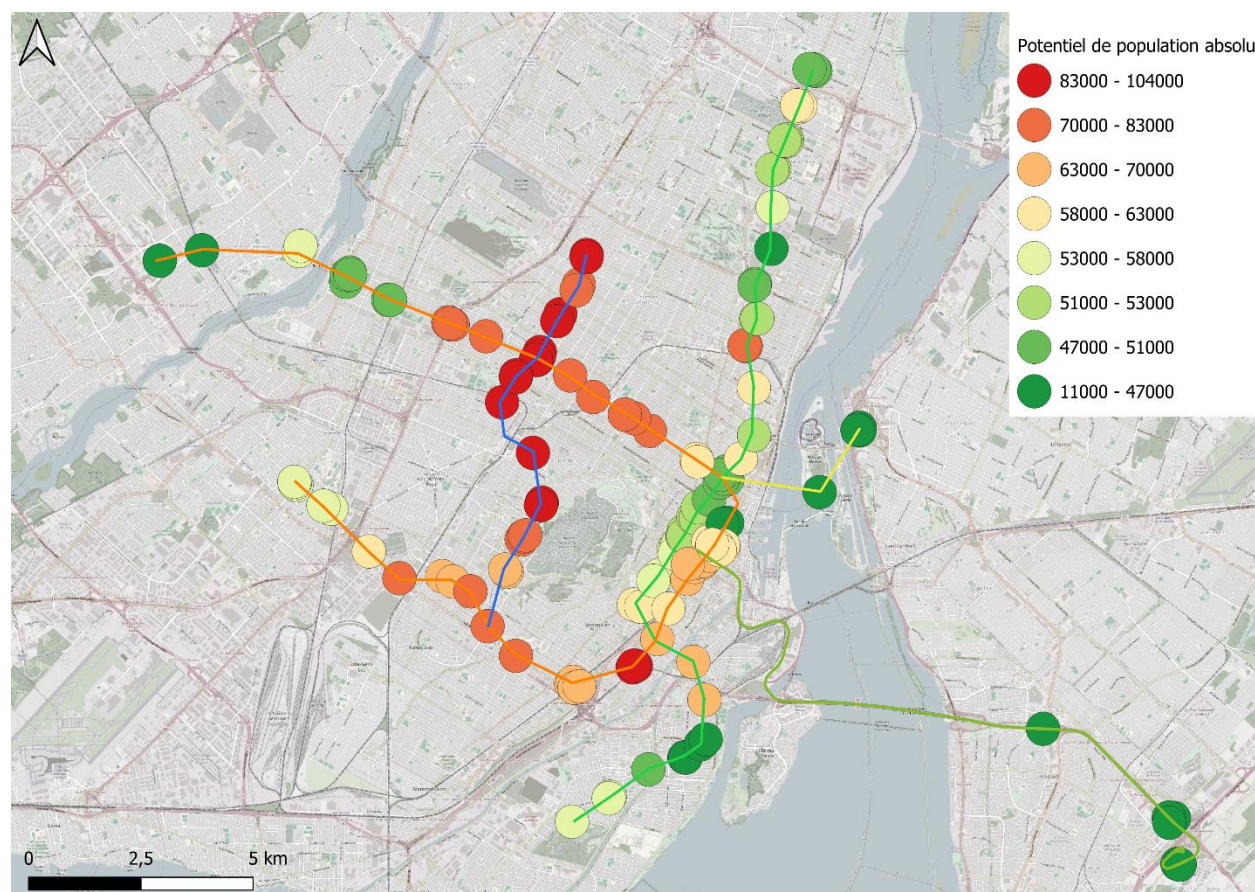


Figure 4.4 Représentation spatiale du potentiel de population latent au pas de temps 10 minutes pour chaque station

Les potentiels les plus élevés sont concentrés principalement dans l'est de la ligne Bleue, ainsi que dans l'ouest de la ligne Orange, et les stations du Plateau Mont Royal. Cette distribution des potentiels montre une divergence intéressante par rapport aux tendances observées dans les indicateurs précédents.

Dans le centre-ville, où les performances étaient généralement bonnes pour les autres indicateurs, le potentiel latent se révèle limité. Cependant, le Plateau Mont Royal, malgré de bons résultats précédents, présente encore un fort potentiel latent en raison de sa densité démographique élevée.

Pour les stations qui performaient précédemment les moins bien, on retrouve les stations de l'ouest de la ligne Orange, où on constate un potentiel important, indiquant une nécessité de

développement ou d'amélioration des infrastructures cyclables. À l'inverse, les stations du REM dans des zones de faible densité de population montrent un potentiel plus limité malgré leur performances plus faibles sur les autres indicateurs.

Cette analyse détaillée aide à identifier les zones où l'investissement dans les infrastructures cyclables serait le plus impactant, en permettant d'atteindre un nombre plus élevé de personnes actuellement mal desservies.

4.2.9 Synthèse des résultats

Le ci-dessous présente la distribution des valeurs obtenus pour tous les indicateurs au seuil de temps 10 minutes.

Tableau 4.6 Distribution des valeurs obtenues pour tous les indicateurs au pas de temps 10 minutes

Indicateur	Moyenne	Min	25ème centile	Médiane	75ème centile	Max
Surface (km ²)	3,58	1,22	2,58	3,36	4,56	6,58
Périmètre (km)	15,67	8,69	12,86	15,47	18,49	25,01
Ratio P/S (km/km ²)	4,82	2,86	3,80	4,51	5,32	10,28
Longueur réseau routier (km)	67,28	18,48	44,79	61,55	85,64	169,09
Densité du réseau routier (km/km ²)	19,10	14,47	16,16	17,33	18,83	55,76
Longueur réseau cyclable (km)	18,23	1,98	10,47	15,73	25,52	51,81
Densité du réseau cyclable (km/km ²)	4,79	1,58	3,69	4,47	5,61	11,27
PCST (%)	28,05	9,86	20,71	27,06	35,73	49,63
PCPT (%)	35,68	0,00	25,14	36,31	45,30	63,46
Potentiel de nouvelle population	56019	7134	45282	58443	69367	95277

Cette synthèse permet d'identifier des tendances cohérentes avec l'analyse individuelle de chaque indicateur tout en facilitant une comparaison entre les différents paramètres.

On observe que la valeur du PCPT est globalement supérieure à celle du PCST, ce qui confirme que la population n'est pas uniformément répartie autour des stations de métro. En effet, la densité est plus élevée à proximité des stations et diminue progressivement avec la distance.

De plus, la longueur moyenne du réseau routier non cyclable est nettement supérieure à celle du réseau cyclable, illustrant un déséquilibre significatif en termes de couverture des infrastructures. Le réseau non cyclable est ainsi environ 3,7 fois plus long en moyenne.

On observe une corrélation entre les indicateurs : les stations qui montrent de faibles performances dans un indicateur tendent également à avoir des résultats faibles dans d'autres. Cela suggère que les indicateurs sont corrélés. Un seul indicateur semble décorrélié des autres : le potentiel brut de nouvelle population.

4.2.10 Classement des stations en fonction de l'accessibilité cyclable

Après avoir calculé les différents indicateurs pour qualifier les surfaces accessibles à vélo depuis chaque station, on propose d'établir un classement des stations entre elles. Pour cela, une méthode de classement est d'abord mise en œuvre puis un regroupement des stations est réalisé.

4.2.10.1 Classement par score normalisé

La méthode utilisée repose sur la normalisation des valeurs obtenues pour différents indicateurs pour chaque station. Deux indicateurs principaux ont été retenus pour cette analyse :

- Le pourcentage de couverture de la population théorique PCPT (voir section 3.6.7).
- Le potentiel absolu de population latent (voir section 3.6.8).

Afin de combiner les performances pour chaque station sur les différents pas de temps, une moyenne des scores normalisés pour chaque pas de temps a été réalisée. La normalisation des indicateurs permet de comparer des valeurs hétérogènes, en les ramenant toutes sur une échelle commune de 0 à 1, selon la formule suivante :

$$Score\ normalisé = \frac{Valeur - Valeur\ minimale}{Valeur\ maximale - Valeur\ minimale} \quad (4.1)$$

Cette normalisation a été effectuée pour chaque indicateur, et ce, pour chaque station. Une fois les scores normalisés obtenus pour chaque pas de temps, une moyenne a été calculée afin d'obtenir un score unique pour chaque station. Ce score final reflète la performance relative des stations selon les deux indicateurs choisis et permet d'établir un classement global présenté dans la Figure 4.5

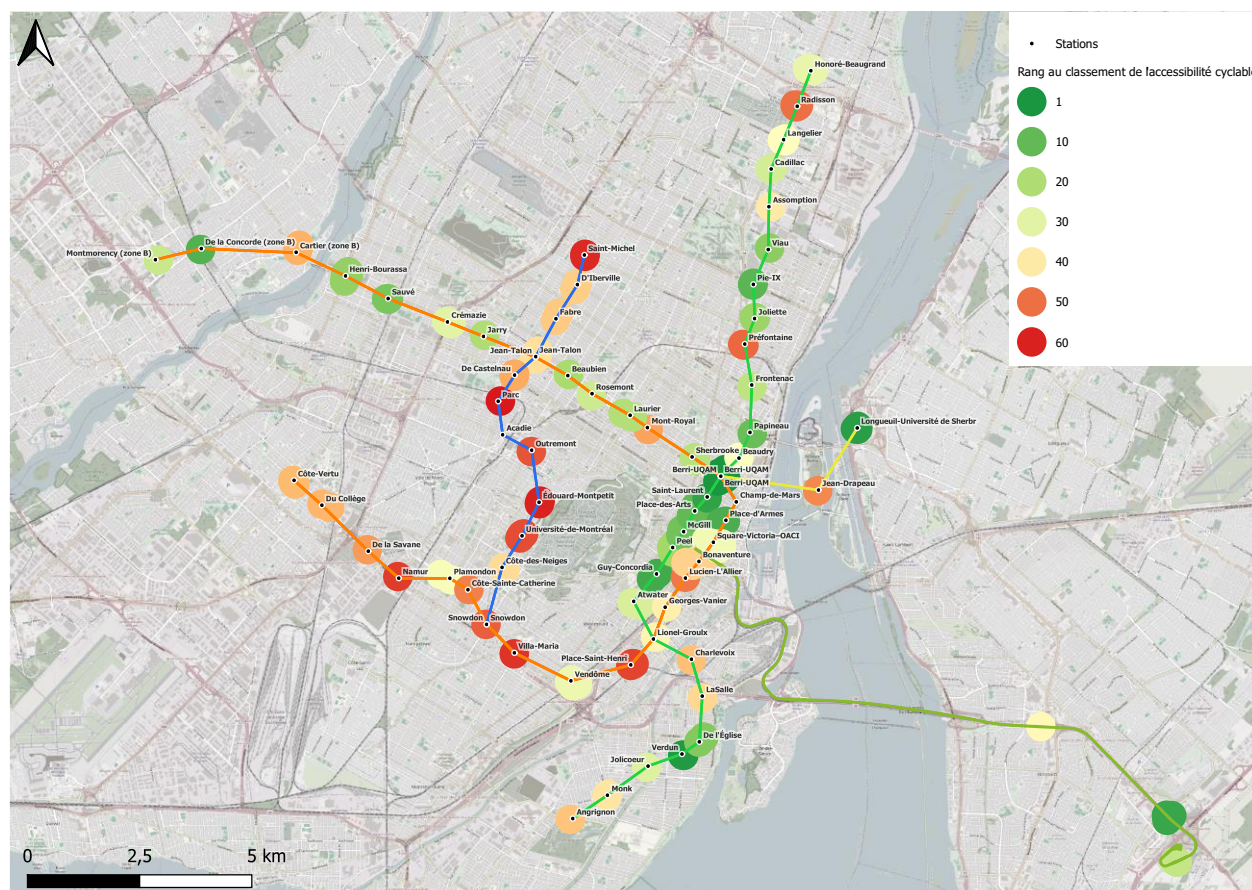


Figure 4.5 Représentation du classement d'accessibilité cyclable des stations

Cette méthode de classement révèle de nouvelles tendances dans l'analyse des stations de métro. En effet, en combinant les deux indicateurs, certaines stations présentent des résultats inattendus par rapport à ce que l'on aurait pu anticiper en observant chaque indicateur séparément.

Par exemple, des stations situées dans des zones traditionnellement considérées comme bien desservies par le réseau cyclable, comme celles du Plateau Mont-Royal, ne performant pas aussi bien dans ce classement global. Bien qu'elles parviennent à desservir une grande partie de la population à proximité, les zones qui ne sont pas couvertes représentent des parties très densément peuplées. Cette situation crée un déficit important et expose un potentiel inexploité en termes

d'accessibilité cyclable. Ainsi, malgré un bon PCPT, le potentiel absolu reste limité par ces zones non couvertes.

À l'inverse, certaines stations comme Brossard se retrouvent bien classées, alors même qu'elles n'affichent pas un bon score en termes de PCPT. Cela s'explique par le fait que les zones environnantes ne sont pas densément peuplées, et donc, le potentiel inexploité reste relativement faible, ce qui pénalise moins ces stations dans le classement global.

Un autre exemple intéressant est celui des stations situées le long de la ligne bleue et à l'ouest de la ligne Orange. Ces stations présentent souvent une faible couverture en termes de population, mais elles disposent d'un fort potentiel de desserte supplémentaire. Elles pourraient potentiellement améliorer leur performance en desservant un plus grand nombre de personnes si des infrastructures cyclables supplémentaires étaient mises en place. À l'inverse, les stations du centre-ville montrent une bonne couverture avec un PCPT élevé, mais le potentiel de croissance en termes de personnes supplémentaires à desservir semble limité, car la plupart des zones densément peuplées y sont déjà bien desservies.

Ces résultats montrent que les deux indicateurs choisis – le PCPT et le potentiel latent – révèlent des tendances différentes, mais fonctionnent ensemble. Le classement global, bien qu'instructif, doit être interprété avec prudence. Il permet de représenter certaines tendances globales liées à ces indicateurs, mais ne doit pas se substituer à une analyse plus fine de chaque indicateur pris séparément. En effet, une station mal classée dans cette approche pourrait avoir de bons résultats pour l'un des deux indicateurs et, inversement, une station bien classée pourrait masquer des faiblesses sur l'un des critères.

4.2.10.2 Regroupement des stations à l'aide de l'algorithme k-moyennes

Afin d'identifier des tendances communes et de mieux cibler les stratégies d'amélioration du réseau cyclable autour des stations de métro, nous avons entrepris de regrouper les stations en fonction des deux indicateurs précédant : le pourcentage de couverture de la population théorique PCPT (voir section 3.6.7) et le potentiel absolu de population latent (voir section 3.6.8). L'objectif est de créer des groupes de stations partageant des caractéristiques similaires, afin de faciliter l'analyse des priorités pour l'amélioration des infrastructures cyclables.

Méthodologie

Nous avons appliqué la méthode de regroupement k-moyennes pour classer les stations en plusieurs groupes. Le k-moyennes est un algorithme de partitionnement qui regroupe les stations en groupes selon leur proximité dans l'espace défini par les deux indicateurs. Après avoir testé plusieurs nombres de groupes, nous avons retenu la division en quatre groupes, identifiée comme optimale à l'aide de la méthode du coude.

Résultats

La Figure 4.6 montre la répartition des stations dans les 4 groupes en fonction du PCPT et du potentiel de population.

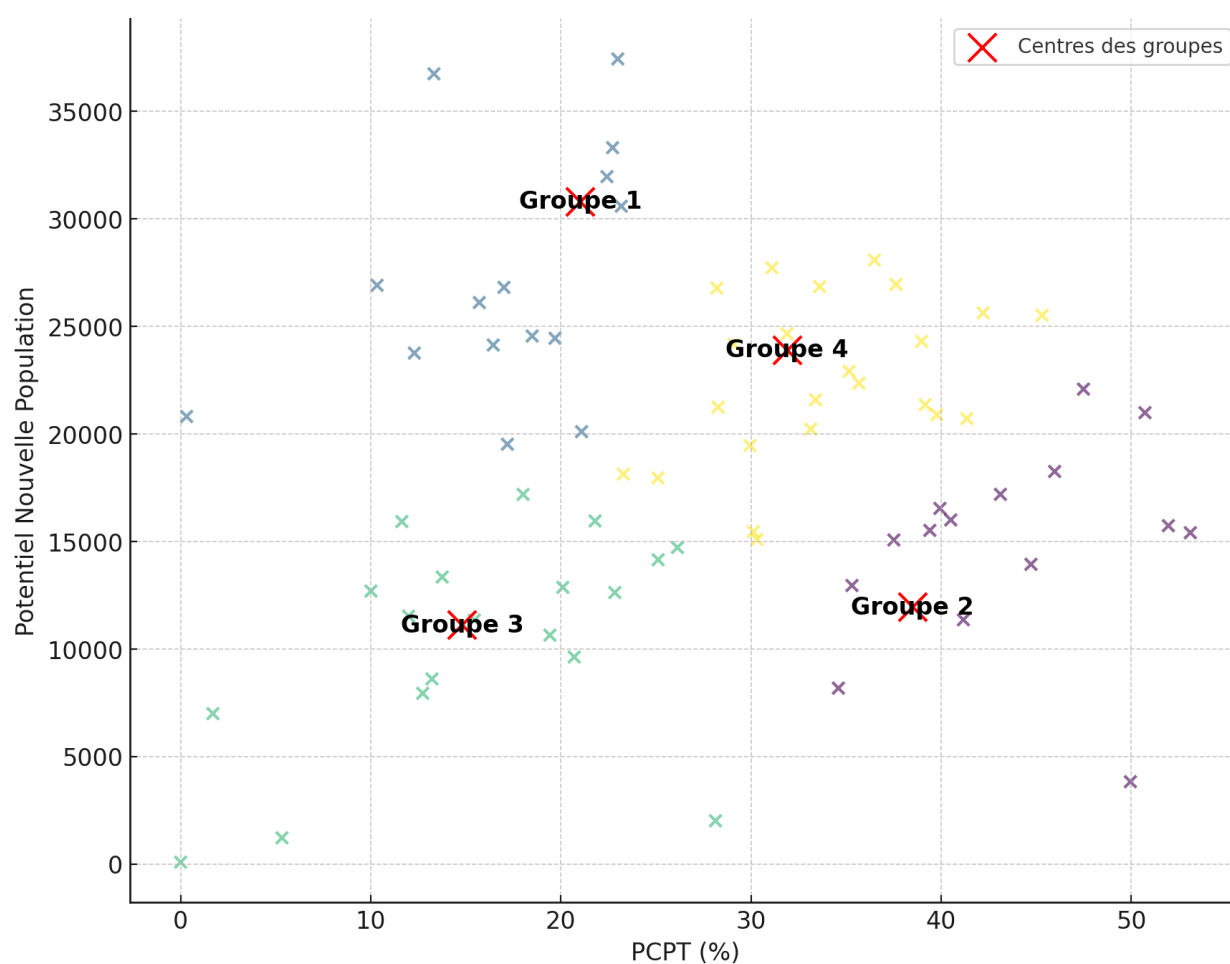


Figure 4.6 Classification des stations en fonction du PCPT et du potentiel de population (4 groupes)

La Figure 4.7 montre la répartition des 4 groupes à l'échelle de Montréal.

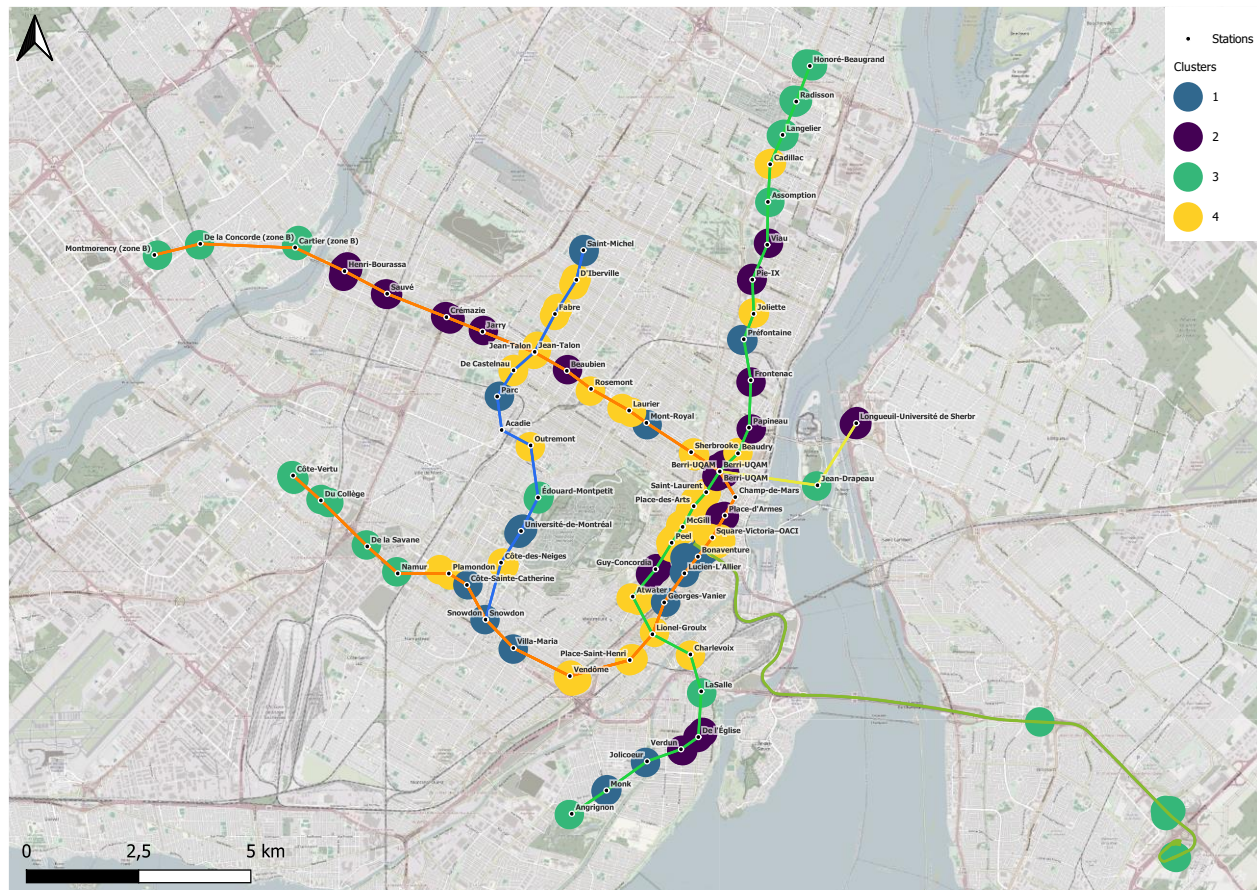


Figure 4.7 Représentation des groupes à l'échelle de la ville

Les quatre groupes obtenus reflètent des tendances distinctes dans les performances des stations :

- Groupe 3 regroupe les stations avec un faible potentiel et une couverture limitée. Ce groupe comprend principalement des stations où l'ajout d'infrastructures cyclables supplémentaires n'est probablement pas être une priorité en raison de leur faible impact attendu.
- Groupe 4 contient des stations présentant une couverture et un potentiel intermédiaires. Ces stations pourraient bénéficier de l'ajout d'infrastructures, mais l'impact ne serait pas aussi significatif que pour d'autres groupes.
- Groupe 1 regroupe les stations avec une faible couverture actuelle mais un fort potentiel de croissance. Ces stations sont sous-desservies par les infrastructures cyclables actuelles, mais présentent une opportunité d'expansion significative pour capter de nouvelles populations.

- Groupe 2 contient les stations ayant déjà une excellente couverture cyclable et un potentiel limité de croissance. Ces stations sont bien desservies, et peu de nouvelles infrastructures sont nécessaires dans ces zones déjà optimisées.

Cette approche de regroupement permet ainsi de structurer les priorités d'investissement en fonction des résultats obtenus précédemment, optimisant l'impact des améliorations sur l'accessibilité cyclable globale.

4.3 Corrélation

Dans cette section, nous explorons les corrélations entre l'indicateur de performance et divers autres indicateurs pour identifier les facteurs ayant le plus d'impact sur l'accessibilité cyclable des stations de métro. Le PCPT est sélectionné comme indicateur de performance principal car il offre une mesure pertinente de l'efficacité avec laquelle une station peut desservir la population environnante par rapport à un contexte idéal.

Pour mener cette analyse, nous examinons la relation entre le PCPT et le ratio de la longueur des voies cyclables par rapport à la longueur totale des routes dans les isochrones pour chaque station. L'idée est de déterminer si une plus grande présence de voies cyclables est associée à une meilleure performance en termes d'accessibilité cyclable. Ce ratio, qui mesure la taille du réseau cyclable par rapport au réseau routier, pourrait révéler comment l'équilibre entre les infrastructures cyclables et routières affecte l'accessibilité. Les données utilisées ne fournissent pas d'information sur le nombre de voies de circulation pour chaque tronçon. Par conséquent, les longueurs et densités comparées se réfèrent uniquement aux longueurs des rues.

Ces analyses de corrélation permettent de comprendre les dynamiques sous-jacentes qui influencent l'efficacité du réseau cyclable et son interaction avec le réseau de transport en commun. Elles aident à identifier si les améliorations de l'infrastructure cyclable pourraient potentiellement augmenter la couverture de la population par les services de transport en commun.

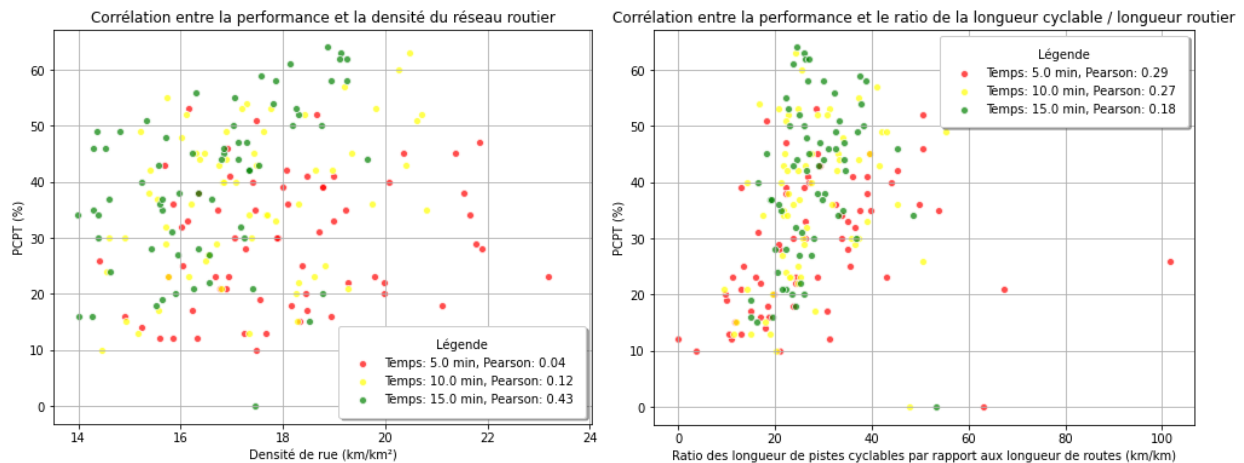


Figure 4.8 Analyses de corrélation de l'accessibilité en fonction de la densité de rue (à gauche) et en fonction du ratio longueur cyclable / routier (à droite)

Premièrement pour l'influence de la densité de rue sur l'accessibilité, le coefficient de Pearson pour cette variable commence à 0.04 pour des intervalles de 5 minutes, indiquant une relation linéaire très faible. Cette valeur augmente jusqu'à 0.12 pour 10 minutes et atteint 0.43 pour 15 minutes, révélant une corrélation modérée. Cela suggère que l'influence de la densité du réseau routier sur l'accessibilité cyclable devient plus prononcée à mesure que la durée des trajets augmente.

Ensuite, la corrélation observée entre le ratio de la longueur totale de piste cyclable sur la longueur totale de rue et la performance de l'accessibilité cyclable, révèle une relation positive mais tout de même modeste. Pour des trajets de 5 minutes, le coefficient de Pearson est de 0.29, indiquant une corrélation faible à modérée, qui diminue légèrement à 0.27 pour les trajets de 10 minutes et encore plus à 0.18 pour les trajets de 15 minutes. Cette tendance suggère que bien que l'augmentation de la taille du réseau cyclable par rapport au réseau routier améliore l'accessibilité. L'effet semble décroître avec des trajets plus longs.

4.4 Scénarios d'amélioration

La Figure 4.9 présente les résultats obtenus pour les trois scénarios aux différents pas de temps. Au centre, les résultats de la situation de référence actuelle montrent les performances d'accessibilité avec une vitesse de déplacement de 12 km/h sur les segments dédiés aux cyclistes et de 6 km/h sur les autres segments. À gauche, le scénario envisage une extension du réseau cyclable, appliquant une vitesse uniforme de 12 km/h sur l'ensemble des segments. À droite, nous explorons l'effet de

l'augmentation de la vitesse sur les tronçons cyclables uniquement, avec une vitesse de 16 km/h sur ces segments et de 6 km/h sur les autres.

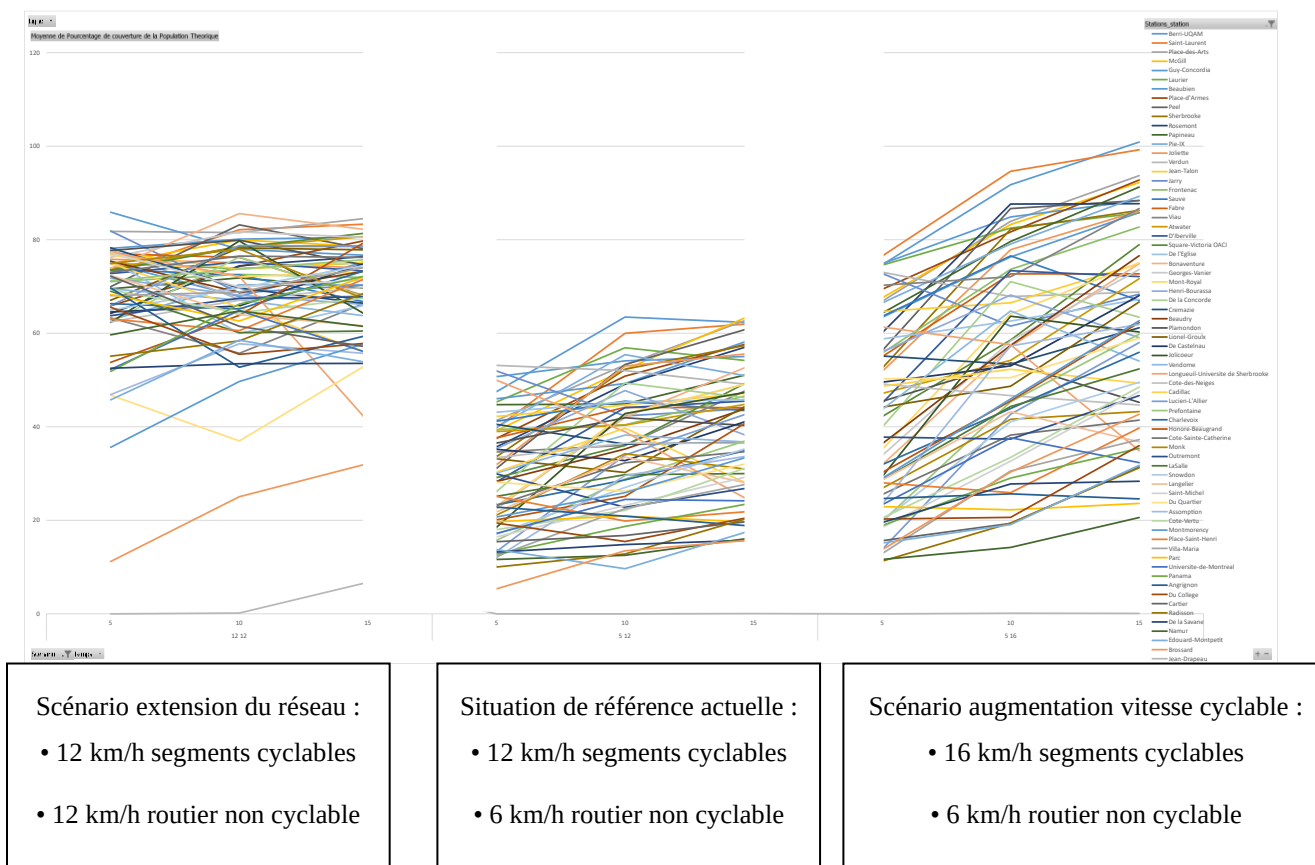


Figure 4.9 Résultats des différents scénarios

La Figure 4.10 présente les résultats obtenus pour les trois scénarios seulement au pas de temps de 10 minutes pour une meilleure clarté.

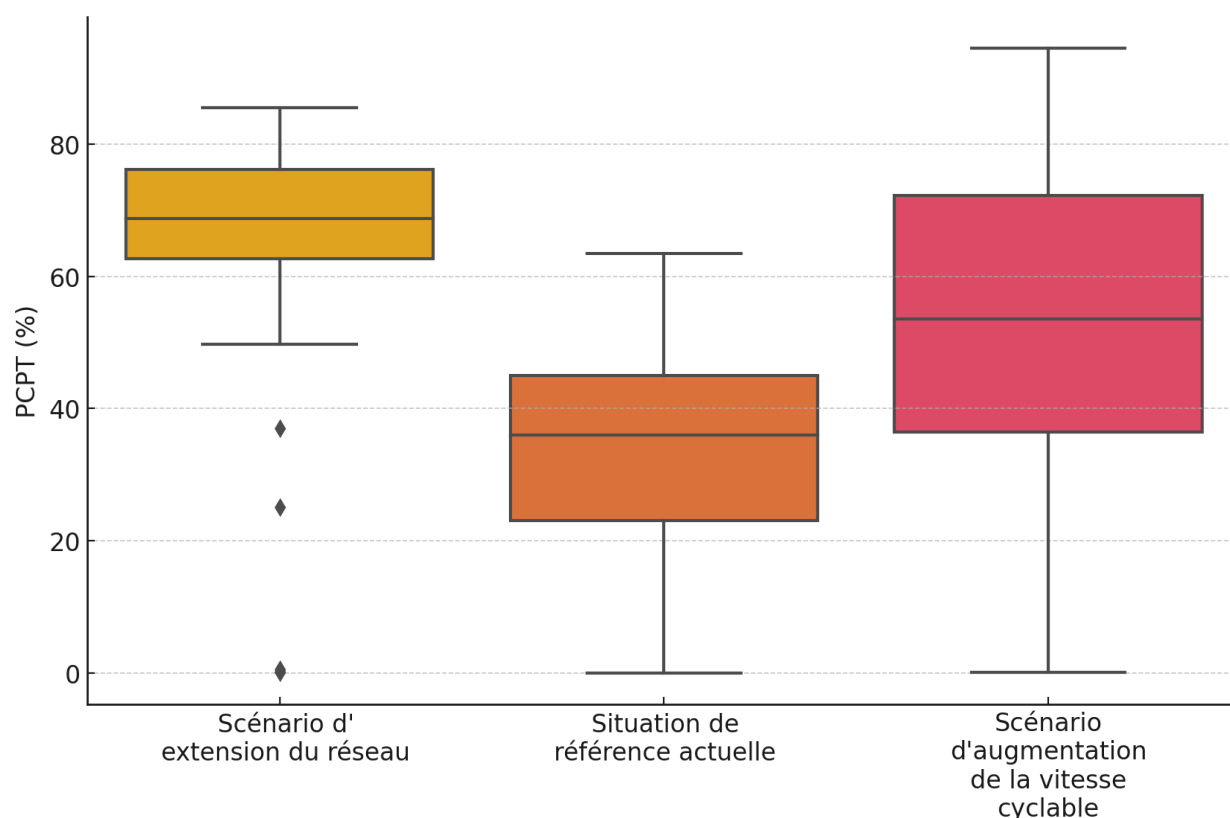


Figure 4.10 Diagramme boîte à moustache de l'indicateurs PCPT de chaque station aux différents scénarios pour le pas de temps 10 minutes

Dans le scénario actuel (au centre), les scores d'accessibilité cyclable des différentes stations varient d'environ 10 à 60 %. La distribution des scores entre ces extrêmes est assez uniforme, reflétant une hétérogénéité dans la performance des infrastructures cyclables à travers les différentes stations.

Le scénario d'extension du réseau cyclable (colonne de gauche) montre une nette amélioration, avec des scores variant de 60 à 80 %. Les stations sont presque toutes regroupées dans cet intervalle. Ce résultat est particulièrement remarquable pour les stations situées à l'ouest de la ligne orange, qui, malgré de faibles performances pour tous les indicateurs étudiés lors de l'analyse de la situation actuelle, atteignent des scores excellents sous ce nouveau scénario. Cela indique non seulement le manque d'infrastructure dans ces zones mais démontre également que des améliorations peuvent radicalement transformer l'accessibilité, offrant une perspective prometteuse pour ces régions actuellement sous-desservies. Les stations avec une bonne accessibilité semblent toujours

bénéficier des améliorations apportées. Ainsi il semble que le développement de nouvelles infrastructures cyclables dans ces zones déjà bonnes soit toujours avantageux.

Dans le scénario d'augmentation de la vitesse sur les voies cyclables (à droite), les résultats sont plus hétérogènes, avec des scores allant de 10 à presque 100 %. Cette variation montre que les améliorations peuvent être extrêmement efficaces dans certaines zones, améliorant presque parfaitement la performance des stations bien équipées, mais elles n'ont que peu ou pas d'impact sur les stations qui souffraient auparavant d'un manque significatif en infrastructures.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Cette conclusion récapitule les principales contributions de cette étude ainsi que les résultats majeurs obtenus, tout en soulignant les limitations qui ont pu affecter les analyses. Enfin, des pistes sont proposées pour orienter les futures recherches sur l'accessibilité cyclable et son intégration avec le transport en commun.

5.1 Résumé des principales contributions

Ce mémoire apporte plusieurs contributions méthodologiques à l'étude des interactions entre le vélo et les transports en commun, en se concentrant sur l'accessibilité cyclable autour des stations de métro à Montréal.

Premièrement, cette étude propose une méthodologie simple et reproductible pour l'identification des bassins d'accessibilité cyclable. Cette approche intègre des critères de confort cyclable, une dimension souvent sous-estimée dans les études de mobilité. En prenant en compte la qualité et la sécurité des infrastructures cyclables, la méthodologie permet de mieux évaluer l'accessibilité réelle de différents points d'intérêts.

La contribution principale de cette recherche réside dans la définition et l'analyse des indicateurs d'accessibilité cyclable, indicateurs qui permettent de faire le diagnostic systématique de l'accessibilité cyclable aux stations de métro. Ces indicateurs, développés spécifiquement pour cette étude, permettent de quantifier de manière précise les performances des infrastructures actuelles et de mesurer les gains potentiels liés à des ajustements ciblés. Ils offrent une vision détaillée et nuancée de l'accessibilité cyclable, aidant à prioriser les investissements dans les infrastructures pour maximiser leur impact.

La méthodologie est appliquée à l'étude des stations de transport en commun à vélo et permet d'identifier les zones où des interventions pourraient être bénéfiques pour améliorer cette accessibilité.

Ensuite, cette recherche propose une modélisation des scénarios d'amélioration du réseau cyclable, montrant comment des ajustements ciblés dans les infrastructures peuvent influencer l'accessibilité des stations de transport en commun. En simulant l'impact de ces améliorations sur l'accessibilité cyclable, l'étude met en évidence des gains significatifs dans certaines zones de l'île de Montréal,

démontrant la pertinence d'investir dans des infrastructures cyclables pour encourager une mobilité plus durable et intermodale.

Enfin, une analyse comparative des outils de calcul d'accessibilité a été effectuée pour identifier l'outil le plus adapté à cette étude. Bien que cette comparaison ne constitue pas l'élément central de l'étude, elle a permis de valider le choix d'un outil open source, capable d'intégrer des critères de confort cyclable tout en offrant une grande flexibilité. Cette comparaison fournit également des pistes pour l'amélioration des outils existants.

5.2 Résumé des principaux résultats

Les principaux résultats de cette étude sur l'accessibilité cyclable aux stations de métro à l'échelle de l'île de Montréal révèlent plusieurs points clés.

5.2.1 Accessibilité cyclable des stations de métro à l'échelle de l'île de Montréal

À l'échelle de l'île, 39,7 % de la population peut atteindre une station de métro en 10 minutes à vélo, et ce chiffre atteint 51,6 % pour un trajet de 15 minutes, avec la méthodologie de calcul proposée. Ces résultats montrent que pour un grand nombre d'habitants, l'intégration du vélo avec les transports en commun pourrait considérablement augmenter l'accessibilité des transports en commun.

5.2.2 Comparaison avec l'accès aux transports en commun à pied

Le potentiel du vélo pour étendre la surface d'attraction des transports en commun semble important. Pour un trajet de 10 minutes, 39,7 % de la population a accès à vélo à une station de métro, contre seulement 28,2 % à pied. Cela représente environ 230 000 personnes supplémentaires pouvant atteindre une station de métro à vélo en 10 minutes. Pour un trajet de 15 minutes, 51,6 % de la population a accès contre 38,7 % à pied.

5.2.3 Résultats des différents indicateurs par station

Certaines stations, telles que Namur, De la Savane et Angrignon, montrent une absence totale de voies cyclables accessibles dans un rayon de 10 minutes. Cette absence critique d'infrastructure met en lumière les zones où des améliorations du réseau cyclable pourraient significativement accroître l'accessibilité et encourager une utilisation combinée vélo-transport en commun.

Les stations du Plateau Mont-Royal et du centre-ville affichent de bien meilleurs résultats, tandis que celles de l'ouest de la ligne orange et de la ligne bleue, ainsi que les terminus de la ligne verte, présentent des performances moins favorables. Ces résultats indiquent des disparités importantes en termes d'accessibilité cyclable selon les stations.

Les résultats montrent que les potentiels de développements supplémentaires sur les bases des lieux de domiciles les plus élevés se concentrent principalement dans l'est de la ligne bleue, l'ouest de la ligne orange et autour des stations du Plateau Mont-Royal. Cette répartition contraste avec les tendances observées dans d'autres indicateurs. Par exemple, bien que les stations du centre-ville affichent généralement de bonnes performances, leur potentiel latent pour l'amélioration reste limité. À l'inverse, le Plateau Mont-Royal, qui présente déjà de bons résultats en matière d'accessibilité, montre un potentiel encore élevé en raison de sa forte densité démographique. De plus, les stations de l'ouest de la ligne orange, qui étaient parmi les moins bien desservies, affichent un fort potentiel d'amélioration, soulignant l'importance du développement d'infrastructures cyclables dans ces zones. En revanche, les stations du REM situées dans des zones de faible densité montrent un potentiel plus limité, malgré leurs performances globalement faibles sur d'autres indicateurs.

5.2.4 Analyse de corrélation

L'analyse de la corrélation entre la longueur totale des voies cyclables et la performance de l'accessibilité cyclable montre une relation positive bien que modeste. Elle souligne l'impact des investissements dans les infrastructures cyclables sur l'amélioration de l'accessibilité à vélo.

5.2.5 Scénarios d'amélioration du réseau cyclable

Les scénarios d'amélioration proposés permettent d'améliorer l'accessibilité cyclable des stations de métro mais pas de la même façon selon l'accessibilité actuelle de chaque station.

Le scénario d'extension du réseau cyclable montre des améliorations significatives pour la plupart des stations, en particulier celles de l'ouest de la ligne orange, qui passent de performances faibles à des scores excellents. Cela démontre que des améliorations du réseau cyclable dans ces zones sous-desservies peuvent transformer radicalement l'accessibilité. En revanche, même dans les zones bien desservies, un ajout de piste cyclable ne semble jamais être inutile.

Le scénario d'augmentation de la vitesse sur les voies cyclables montre des résultats plus hétérogènes, avec des impacts variables selon l'accessibilité actuelle de chaque station. Une station actuellement bien desservie profitera largement plus d'une amélioration de la vitesse qu'une station mal desservie.

Ces scénarios montrent que, bien que les deux types d'améliorations soient bénéfiques, leur efficacité dépend de la situation actuelle des infrastructures : l'ajout de voies cyclables est plus pertinent dans les zones mal desservies, tandis que l'amélioration de la vitesse profite davantage aux stations déjà bien desservies.

5.3 Limitation de l'étude

La conclusion d'un mémoire de recherche inclut nécessairement une réflexion sur les limitations de l'étude. Ces limitations, qui peuvent résulter des choix méthodologiques, des contraintes de données, ou des hypothèses de départ, sont essentielles pour contextualiser les résultats obtenus et guider les recherches futures. Cette section vise à discuter de ces limites pour offrir une interprétation juste des conclusions et établir des directions pour les études ultérieures.

5.3.1 Hypothèse de marchabilité des segments non cyclables

L'étude repose sur l'hypothèse que la vitesse sur les segments routiers non cyclables est de 5 km/h, simulant une situation où les cyclistes doivent descendre de leur vélo et marcher, impliquant ainsi l'existence de trottoirs sécurisés. Cette hypothèse n'a pas été systématiquement vérifiée à travers l'ensemble du réseau étudié, ce qui peut induire des inexactitudes dans l'évaluation de l'accessibilité, surtout dans les zones où les aménagements piétonniers sont insuffisants ou inexistants.

5.3.2 Sécurité aux intersections non considérée

Bien que l'étude mette un accent sur la sécurité des tronçons cyclables, elle omet de prendre en compte la sécurité aux intersections. Ces zones, où les chemins des différents véhicules se croisent, sont cruciales car elles représentent un risque significatif d'accidents. Ne pas les inclure dans l'analyse peut affecter la fiabilité de notre évaluation de l'accessibilité sécurisée, sous-estimant potentiellement les risques encourus par les cyclistes.

5.3.3 Non prise en compte des pentes

L'outil de calcul des isochrones utilisé dans notre étude ne tient pas compte des pentes, bien que ces dernières soient déterminantes dans la sélection des itinéraires par les cyclistes. Une méthodologie plus raffinée pourrait intégrer un ajustement de la vitesse selon la pente de chaque tronçon, utilisant un modèle d'élévation numérique pour appliquer des coefficients qui modulent la vitesse de manière réaliste selon la pente du segment.

5.3.4 Choix du réseau cyclable et de la vitesse de parcours

Notre approche distincte pour la vitesse sur les segments du réseau cyclable sécuritaire et celle sur les segments routiers est une caractéristique déterminante de l'étude. Toutefois, étant donné que le réseau cyclable de la ville n'est pas homogènement sécuritaire, il serait judicieux de définir un réseau personnalisé. On pourrait envisager d'évaluer chaque tronçon sur la base de plusieurs paramètres de sécurité et de ne considérer comme sécuritaires que ceux qui répondent à un certain standard. Toutefois, déterminer de manière universelle l'accessibilité et la sécurité d'un tronçon s'avère complexe. Ainsi, il est possible que cette méthode sous-estime l'accessibilité de stations entourées par des rues locales à faible vitesse et débit de circulation mais sans aménagement cyclable, qui sont toutefois déjà conviviales pour les cyclistes. Inversement, il est aussi possible que la contribution d'une voie cyclable peu confortable (ex : bande cyclable étroite sans séparation physique) au score d'accessibilité de la station soit surestimée.

Une alternative serait de moduler la vitesse selon un score de sécurité attribué à chaque segment. Cette méthode, toutefois, s'aligne sur les pratiques des calculateurs de chemin tels qu'OSRM, qui ajustent déjà les itinéraires en fonction des niveaux de sécurité. Cela soulève une question cruciale: est-il approprié de considérer qu'un segment de sécurité modérée est suffisamment sûr pour être inclus dans le réseau cyclable? Cette interrogation met en lumière les défis de définir précisément l'accessibilité dans un contexte urbain complexe.

Dans la même réflexion, une amélioration potentielle de la méthodologie consisterait à inclure certains sentiers de parcs au sein du réseau cyclable. Actuellement, le réseau officiel ne reconnaît pas tous les chemins piétonniers qui sont en réalité praticables à vélo. Cela donne l'impression que certains parcs sont inaccessibles pour les cyclistes, alors que les sentiers y sont effectivement utilisables. Toutefois, cette inclusion nécessiterait une vérification manuelle pour s'assurer de la praticabilité des chemins en question, car tous les chemins piétonniers ne sont pas adaptés à la circulation cycliste, notamment ceux composés de terre ou d'autres surfaces non stabilisées. Cette

réflexion peut finalement s'étendre à toute la ville, ce qui justifie le choix de prendre directement le réseau cyclable fourni par la ville dans un souci de simplicité et d'homogénéité.

5.3.5 Données de population et analyse des résultats

L'analyse actuelle s'appuie sur des données de recensement pour évaluer la population desservie par les bassins d'accessibilité. Ainsi tous les résultats sont fondés sur la base des lieux de domicile. En termes de destinations, certaines stations pourraient bénéficier d'une bonification.

En effet, cette méthode ignore d'autres générateurs de déplacements tels que les zones commerciales, les parcs, hôpitaux, bureaux, industries ou les parcs, qui sont dépourvus de résidence mais génèrent un achalandage significatif. Une méthode améliorée intégrerait les données issues de l'enquête OD, offrant ainsi une compréhension des destinations et des générateurs de déplacements.

5.3.6 Non prise en compte des distances de marche dans les stations

Il est important de préciser que dans cette étude, nous considérons qu'un usager ayant atteint n'importe quel édicule d'une station a effectivement accédé à la station elle-même. Cela ne prend pas en compte le temps de sécuriser son vélo ainsi que le temps de marche à l'intérieur de la station pour accéder au quai, ni le temps d'attente du métro. Cette hypothèse simplifie l'analyse tout en focalisant sur l'accès initial aux infrastructures de transport en commun mais constitue une limite qu'il est important de souligner.

5.4 Suggestions pour de futures recherches

Dans cette conclusion, il est essentiel de réfléchir aux améliorations méthodologiques qui pourraient être apportées pour pallier les limitations identifiées dans notre étude.

Premièrement, une intégration précise des pentes dans le calcul des isochrones pourrait offrir une estimation plus réaliste de l'accessibilité cyclable, étant donné l'impact significatif des variations topographiques sur la mobilité à vélo.

Deuxièmement, un affinage du réseau cyclable serait bénéfique, en évaluant de manière plus critique la sécurité et l'accessibilité de chaque tronçon, et plus généralement, une évaluation de la convivialité (confort/niveau de stress) du réseau cyclable et routier, permettrait ainsi de mieux cibler les améliorations nécessaires.

Ensuite, on pourrait utiliser les données de recensement pour cibler certains segments de la population pour lesquelles on veut prioriser les améliorations.

Enfin, l'intégration des données issues de l'enquête Origine-Destination pourrait enrichir l'analyse en tenant compte des principaux générateurs de déplacements et des destinations, offrant une meilleure perspective sur l'utilisation du réseau cyclable et son interaction avec le réseau de transport en commun.

5.5 Conclusion générale

Cette étude a exploré les interactions entre le transport en commun et le vélo, à travers une revue de la littérature, nous avons identifié les avantages et les défis liés à la cohabitation de ces deux modes de transport, tout en soulignant leur complémentarité potentielle dans un contexte de mobilité urbaine durable. Les recherches ont montré que l'intégration du vélo avec le transport en commun est une solution efficace pour améliorer l'accès aux stations de transport en commun.

En parallèle, nous avons développé une méthode simple et reproductible pour évaluer l'accessibilité cyclable autour des stations de métro, en y intégrant des critères liés au confort des cyclistes, souvent négligé dans les approches traditionnelles. L'analyse a été appliquée à la ville de Montréal, mettant en évidence que l'intégration du vélo avec les transports en commun représente une solution efficace pour élargir le bassin d'attraction des stations de métro. Comparativement à l'accès à pied, l'usage du vélo permet de desservir un plus grand nombre de personnes en un temps de trajet similaire, renforçant ainsi l'argument en faveur de l'intermodalité. Les résultats soulignent également des disparités marquées selon les zones géographiques : alors que certaines stations, notamment celles du centre-ville et du Plateau Mont-Royal, bénéficient déjà d'une accessibilité cyclable importante. D'autres, en particulier dans l'ouest de la ville, présentent des lacunes en matière d'infrastructures. Ces zones représentent des cibles prioritaires pour des améliorations du réseau cyclable.

L'étude a aussi démontré que l'absence de voies cyclables autour de certaines stations limite considérablement leur potentiel d'accessibilité, tandis que les stations déjà bien desservies pourraient encore bénéficier d'améliorations liées à la vitesse et au confort des voies. Les scénarios proposés d'extension des infrastructures cyclables montrent une nette amélioration de l'accessibilité pour plusieurs secteurs, particulièrement là où les infrastructures sont actuellement insuffisantes.

Cette analyse met en lumière l'importance d'investissements dans les infrastructures cyclables pour maximiser le potentiel des transports en commun.

RÉFÉRENCES

- A. Caro, R. (1974). *The power broker : Robert Moses and the fall of New York*.
- Abdollahpour, S. S. (2024). *Built environment's nonlinear effects on mode shares around BRT and rail stations*.
- Adam, M., Yevgeniy, G., & Marc, S. (2014). *Does active commuting improve psychological wellbeing ? Longitudinal evidence from eighteen waves of the British Household Panel Survey*.
- Akter, S., & Aziz, A. (2023). *Assessing Impacts of Shared Bike-Bus Lanes on Bus Operations*.
- Alfred, R., Best, L., & Jones, P. (2019). *Cyclists in shared bus lanes : Could there be unrecognised impacts on bus journey times?*
- Alguren, B., & Rizzi, M. (2022). *In-depth understanding of single bicycle crashes in Sweden—Crash characteristics, injury types and health outcomes differentiated by gender and age-groups*.
- Amiri, M., & Sadeghpour, F. (2015). *Cycling characteristics in cities with cold weather*.
- Andersen, J., & Landex, A. (2009). *GIS-based Approaches to Catchment Area Analyses of Mass Transit*.
- Attademo, L., Bernardini, F., Garinella, R., & Compton, M. (2017). *Environmental pollution and risk of psychotic disorders : A review of the science to date*.
- Attard, M., Guzman, L., & Oviedo, D. (2023). *Urban space distribution : The case for a more equitable mobility system*.
- Autorité régionale de transport métropolitain. (2018). *Enquête Origine-Destination 2018 de Montréal*.
- Basu, R., & Samet, J. (2002). *Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality : A Review of the Epidemiologic Evidence*.
- Benatia, D., Julien, M., & Beaudin, G. (2024). *Mobilité Montréal : Les coûts sociaux des transports*.
- Berg Martensson, H., Larsen, K., & Hojer, M. (2023). *Investigating potential effects of mobility and accessibility services using the avoid-shift-improve framework*.
- Bergstrom, A., & Magnusson, R. (2003). *Potential of transferring car trips to bicycle during winter*.

- Blomqvist, G., & Niska, A. (2018). *Nordic experiences of salt use for winter maintenance of bicycle paths : Winter service on bicycle paths in Denmark.*
- Boogaard, H., Patton, A. P., Atkinson, R. W., Brooks, J. R., Chang, H. H., Crouse, D. L., Fussell, J. C., Hoek, G., Hoffmann, B., Kappeler, R., Kutlar Joss, M., Ondras, M., Sagiv, S. K., Samoli, E., Shaikh, R., Smargiassi, A., Szpiro, A. A., Van Vliet, E. D. S., Vienneau, D., ... Forastiere, F. (2022). *Long-term exposure to traffic-related air pollution and selected health outcomes : A systematic review and meta-analysis.*
- Boucher, J., & Friot, D. (2017). *Primary microplastics in the oceans.*
- Brandenburg, C., Matzarakis, A., & Arnberger, A. (2007). *Weather and cycling—A first approach to the effects of weather conditions on cycling.*
- Brousseau-Pouliot, V. (2023). *Québec pédale moins vite que nous.*
- Buck, D., & Buehler, R. (2013). *Are Bikeshare Users Different from Regular Cyclists ? A First Look at Short-Term Users, Annual Members, and Area Cyclists in the Washington, D.C., Region.*
- Buck, T., & Jensen, S. (2017). *Incidents between straight-ahead cyclists and right-turning motor vehicles at signalised junctions.*
- Buehler, R. (2012). *Integration of cycling with public transport.*
- Buehler, R., & Hamre, A. (2014). *The multimodal majority ? Driving, walking, cycling, and public transportation use among American adults.*
- Buehler, R., & Hamre, A. (2016). *An examination of recent trends in multimodal travel behavior among American motorists.*
- Bull, F. C., Al-ansari, S. S., Biddle, S., Borodulin, K., Buman, M. P., Cardon, G., Carty, C., Chaput, J.-P., Chastin, S., Chou, R., Dempsey, P. C., DiPietro, L., Ekelund, U., Firth, J., Friedenreich, C. M., Garcia, L., Gichu, M., Jago, R., Katzmarzyk, P. T., ... Willumsen, J. (2020). *World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour.*
- CAA Québec. (s. d.). *Coûts d'utilisation des véhicules* [Jeu de données]. Consulté 20 novembre 2023, à l'adresse <https://www.caaquebec.com/fr/sur-la-route/conseils/outils-et-references/couts-dutilisation-des-vehicules/>
- Canepa, B. (2007). *Bursting the Bubble : Determining the Transit-Oriented Development's Walkable Limits.*

- Cavalcante de Macedo, M. M. (2018). *Safety Evaluation of a Shared Bus-Bike Lane (SBBL) using Video Recorded Conflict Data*.
- Census Reporter. (2018). Census profile : Seattle, WA Urbanized Area. [Jeu de données]. <https://censusreporter.org>
- Chapman, D., & Larsson, A. (2021). *Practical urban planning for winter cycling; lessons from a Swedish pilot study*.
- Chekir, E. (2023). *Diagnostic de l'accessibilité piétonne aux stations du métro montréalais*.
- Cheng, L., Huang, J., Jin, T., Chen, W., Li, A., & Witlox, F. (2023). *Comparison of station-based and free-floating bikeshare systems as feeder modes to the metro*.
- Chevalier, H. (2024). *Portrait et potentiel du vélo à assistance électrique au Québec*.
- China Automotive News. (2022). *China's car parc amounts to 302 millions units by end of 2021* [Jeu de données].
- Chlond, B. (2011). *Making People Independent from the Car – Multimodality as a Strategic Concept to Reduce CO2-Emissions*.
- Città metropolitana di Milano. (2021). Piano Urbano per la Mobilità Sostenibile (PUMS) della Città metropolitana di Milano. <https://cittametropolitana.mi.it>
- Cools, M., Moons, E., & Wets, G. (2010). *Assessing the Impact of Weather on Traffic Intensity*.
- Courel, J., & Deguitre, L. (2020). *Les déterminants du choix modal : Synthèse des connaissances scientifiques*.
- Crist, P., Martinez, L., & Pritchard, J. P. (2022). *Streets that fit : Re-allocating space for better cities*.
- CycleStreets. (s. d.). *CycleStreets Journey Planner and Photomap*. Consulté 21 décembre 2023, à l'adresse <https://www.cyclestreets.org/>
- Dahl Fenre, M., & Klein-Paste, A. (2021). *Bicycle rolling resistance under winter conditions*.
- Dalkmann, H., & Brannigan, C. (2014). *Urban Transport and Climate Change*.
- Deloitte Insight. (2023). *City Mobility Index*. www.deloitte.com/insights/mobility-index
- Diana, M., & Mokhtarian, P. (2009). *Desire to change one's multimodality and its relationship to the use of different transport means*.
- Dill, J., & McNeill, N. (2012). *Four types of cyclists ? Examination of typology for better understanding of bicycling behavior and potential*.

- Dobbs, L. (2005). *Wedded to the car : Women, employment and the importance of private transport*.
- Dolan, L. M. J., Bohemen, H., Whelan, P., Akbar, K. F., O'Malley, V., O'Leary, G., & Keizer, P. J. (2006). *Towards the sustainable development of modern road ecosystems*.
- Dong, C., Kun, Y., & Chun, G. (2024). *The Relationship between Built Environment Characteristics and Metro Stations Pedestrian Catchment Areas*.
- Dugan, H., Bartlett, S., Burke, S., Doubek, J., Krivak-Tetley, F., Skaff, N., Summers, J., Farrell, K., McCullough, I., Morales-Williams, A., Roberts, D., Ouyang, Z., Scordo, F., Hanson, P., & Weathers, K. (2017). *Salting our freshwater lakes*.
- Ebrahimabadi, S. (2015). *Outdoor Comfort in Cold Climates : Integrating Microclimate Factors in Urban Design*.
- Eco Counter. (2021). *Quantifying and communicating the growth of winter cycling in Montreal* [Jeu de données]. <https://www.eco-counter.com/blog/quantifying-and-communicating-the-growth-of-winter-cycling-in-montreal/>
- Eco Counter. (2024). *Données comptage vélo Montréal* [Jeu de données]. data.eco-counter.com
- EMBARQ. (2013). *Saving Lives with Sustainable Transport*, World Resources Institute.
- English, J. (2018). Why Did America Give Up on Mass Transit ? (Don't Blame Cars.). *Bloomberg*.
- Farber, S., & Marino, M. G. (2017). *Transit accessibility, land development and socioeconomic priority : A typology of planned station catchment areas in the Greater Toronto and Hamilton Area*.
- Farhana, Y., Morency, C., & J.Roorda, M. (2015). Assessment of spatial transferability of an activity-based model, TASHA. 10/06/2015.
- Figliozi, M., Keeling, K., Glick, T., & Crumley, M. (2019). *Evaluation of Bus-Bicycle and Bus/Right-Turn Traffic Delays and Conflicts*.
- Flamm, B., & Rivasplata, C. (2014). *Perceptions of bicycle-friendly policy impacts on accessibility to transit services : The first and last mile bridge*.
- Fleury, A. (2004). *La rue : Un objet géographique ? Tracés*.
- Furth, P. (2014). *Level of Traffic Stress*.
- Galich, A., & Nieland, S. (2023). *The Impact of Weather Conditions on Mode Choice in Different Spatial Areas*.

- Gauthier, M. (2024). *How much does owning a vehicle in Montreal cost in 2024 ? 68% more than in 2019.*
- Godefroy, F. (2011). *Méthodologie de caractérisation du vélopartage et d'estimation du marché potentiel du vélo à Montréal.*
- Gouvernement du Québec. (2021). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre 2021.*
- Guo, Z., Wilson, N., & Rahbee, A. (2007). *Impact of Weather on Transit Ridership in Chicago, Illinois.*
- Hamraie, A. (2017). *BUILDING ACCESS Universal Design and the Politics of Disability.*
- Harrison, R., Allan, J., Carruthers, D., Heal, M., Lewis, A., Marner, B., Murrels, T., & Williams, A. (2021). *Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic : A review.*
- Hedges & Company. (2024). *How Many Cars are there in the World in 2024 ?* [Jeu de données].
- Héran, F., & Ravalet, E. (2008). *La consommation d'espace-temps des divers modes de déplacement en milieu urbain Application au cas de l'Ile de France.*
- Heutschi, K., Buhlmann, E., & Oertli, J. (2016). *Options for reducing noise from roads and railway lines.*
- Hidalgo, D., & Huizenga, C. (2013). *Implementation of sustainable urban transport in Latin America.*
- Himanshu, M. (2024). *Effect of Land Use Land Cover Changes on Urban Floods.*
- Hogema, J. H. (1996). *EFFECTS OF RAIN ON DAILY TRAFFIC VOLUME AND ON DRIVING BEHAVIOUR.*
- Hui, N., Saxe, S., Roorda, M., Hess, P., & Miller, E. J. (2018). *Measuring the completeness of complete streets.*
- Ile-de-France Mobilités. (s. d.). *Questionnaire de l'Enquête Globale Transport (EGT) entre 2023 et 2027.* <https://www.cnis.fr/enquete-globale-transport/>
- Illich, I. (1973). *Energy and Equity.*
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturers. (2020). *Total World Vehicules in Use* [Jeu de données].
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities.*
- Jain, R., Cui, Z., & Domen, J. (2016). *Environmental Impact of Mining and Mineral Processing.*

- Jarry, V., & Apparicio, P. (2021). *Ride in Peace : How Cycling Infrastructure Types Affect Traffic Conflict Occurrence in Montréal, Canada.*
- Johansson, M. S., Korshoj, M., Schnohr, P., Louis, J., Prescott, E., Sogaard, K., & Holtermann, A. (2019). *Time spent cycling, walking, running, standing and sedentary : A cross-sectional analysis of accelerometer-data from 1670 adults in the Copenhagen City Heart Study.*
- Jones, P., Marshall, S., & Boujenko, N. (2008). *Reating more people-friendly urban streets through « Link and Place » street planning and design.*
- Kent, J. (2014). *Driving to save time or saving time to drive ? The enduring appeal of the private car.*
- Khan, J., Ketznel, M., Kakosimos, K., Sorensen, M., & Solvang Jensen, S. (2018). *Road traffic air and noise pollution exposure assessment – a review of tools and techniques.*
- Khosla, R., Miranda, N., rotter, P., Mazzone, A., McElroy, C., Cohen, F., & Jani, A. (2020). *Cooling for sustainable development.*
- Knaap, G.-J., & Ma, T. (2019). *Estimating the Impacts of Capital Bikeshare on Metrorail Ridership in the Washington Metropolitan Area.*
- Kontou, E., McDonald, N., Brookshire, K., Pullen-Seufert, N., & Lajeunesse, S. (2020). *U.S. active school travel in 2017 : Prevalence and correlates.*
- Kosai, S., Matsui, K., Matsubae, K., Yamasue, E., & Nagasaka, T. (2021). *Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances.*
- Kuhnimhof, T., Buehler, R., Wirtz, M., & Kalinowska, D. (2012). *Travel trends among young adults in Germany : Increasing multimodality and declining car use for men.*
- Laviolette, J., Morency, C., & Waygood, O. (2020). *Persistance de l'automobilité ? Analyse en trois perspectives.*
- Lee, J., Choi, K., & Leem, Y. (2016). *Bicycle-based transit-oriented sevelopment as an alternative to overcome the criticisms of the conventional transit-oriented development.*
- Lefebvre-Ropars, G.-L. (2021). *Méthodologie d'évaluation du partage spatiotemporel de la rue.*
- Lepage, S. (2019). *Modélisation des interactions entre les modes de transport aux abords des stations de métro.*
- Lesh, M. C. (2013). *Innovative Concepts in First-Last Mile Connections to Public Transportation.*
- Li, D., & Bou-Zeid, E. (2013). *Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves : The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts.*

- Lin, D., Zhang, Y., Zhu, R., & Meng, L. (2019). *The analysis of catchment areas of metro stations using trajectory data generated by dockless shared bikes.*
- Liu, Y. (2022). *Unravel the spatio-temporal patterns and their nonlinear relationship with correlates of dockless shared bikes near metro stations.*
- Ma, T., Liu, C., & Erdogan, S. (2019). *Bicycle Sharing and Public Transit Does Capital Bikeshare affect Metrorail ridership in washington, D.C.?*
- Makwasha, T., & Turner, B. (2017). *Safety of raised platforms on urban roads.*
- Malatest. (2017). *2017 Capital Regional District Origin Destination Household Travel Survey.*
- Masiol, M., Agostinelli, C., Formenton, G., Tarabotti, E., & Pavoni, B. (2014). *Thirteen years of air pollution hourly monitoring in a large city : Potential sources, trends, cycles and effects of car-free days.*
- McElhanney in Association with Mustel Group. (2019). *2018 Vancouver Panel Survey.*
- Miner, P., M. Smith, B., Jani, A., McNeill, G., & Gathorne-Hardy, A. (2024). *Car harm : A global review of automobility's harm to people and the environment.*
- Miranda-Moreno, L. F., Nosal, T., & Kho, C. (2013). *If We Clear Them, Will They Come ? Study to Identify Determinants of Winter Bicycling in Two Cold Canadian Cities.*
- Miranda-Moreno, L., & Nosal, T. (2011). *Weather or Not to Cycle : Temporal Trends and Impact of Weather on Cycling in an Urban Environment.*
- Morabia, A., Mirer, F., Amstislavski, T., Eisl, H., Werbe-Fuentes, J., Gorczynski, J., Gorason, C., Wolff, M., & Markowitz, S. (2010). *Potential Health Impact of Switching From Car to Public Transportation When Commuting to Work.*
- Morency, C., Trépanier, M., & Demers, M. (2011). *Walking to transit : An unexpected source of physical activity.*
- Nahal, T., & Mitra, R. (2018). *Facilitators and barriers to winter cycling: Case study of a downtown university in Toronto, Canada.*
- National Highway Traffic Safety Administration. (2021). *Traffic Safety Facts Annual Report Tables [WWW Document].*
- National Museum of American History. (2003). *America on the move.*
- Niemeier, D. (1996). *LONGITUDINAL ANALYSIS OF BICYCLE COUNT VARIABILITY: RESULTS AND MODELING IMPLICATIONS.*

- Otim, T., Dorfer, L., Bousbar, D., & Munoz Diaz, E. (2022). *Modeling the Impact of Weather and Context Data on Transport Mode Choices : A Case Study of GPS trajectories from Beijing*.
- Power, A. (2016). *Disability, (auto)mobility and austerity : Shrinking horizons and spaces of refuge*.
- Prepared for NYC DOT, by R. (2019). *2019 Citywide Mobility Survey Results*.
<https://www.nyc.gov/html/dot/downloads/pdf/nycdot-citywide-mobility-survey-report-2019.pdf>
- Presse-Service Wien. (2022). *Wiener Linien : 2022 mehr Stammkund*innen als je zuvor*.
<https://presse.wien.gv.at>
- Pucher, J., & Buehler, R. (2008). *Making Cycling Irresistible : Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany*.
- Pucher, J., & Buehler, R. (2017). *Transport Reviews Cycling towards a more sustainable transport future*.
- Rachel, A., & Woodcock, J. (2008). *Transport : Challenging disabling environments*.
- Rahman, Z., Mattingly, S., Kawadgave, R., Nostikasari, D., Roeglin, N., Casey, C., & Johnson, T. (2019). *Using crowd sourcing to locate and characterize conflicts for vulnerable modes*.
- Raposo, M., & Silva, C. (2022). *City-Level E-Bike Sharing System Impact on Final Energy Consumption and GHG Emissions*.
- Région Québec-Lévis. (2019). *Enquête Origine-Destination 2017 Région Québec-Lévis*.
- Rijsman, L., van Oort, N., Ton, D., Hoogendoorn, S., Molin, E., & Teijl, T. (2019). *Walking and bicycle catchment areas of tram stops : Factors and insights*.
- Rodriguez-Valencia, A. (2015). *The Emergence of Green Street Programs in the U.S. : A Study of Three Cities*.
- Royal Society for Public Health, V., Voice and Practice. (s. d.). *Health in a hurry, The impact of rush hour commuting on our health and wellbeing*.
- S. Szyszkowicz, S. (2018). *Bikebility as an Indicator of Urban Mobility*.
- Sabir, M. (2011). *Weather and travel behaviour*.
- Sander, R. (2014). *Perceived traffic risk for cyclists : The impact of near miss and collision experiences*.
- Saunier, N., & Rabion, A. (2013). *Analyse d'interactions entre usagers motorisés et non-motorisés en presence de pistes cyclables : Cas d'étude à Montréal*.

- Schlossberg, M., & Brown, N. (2004). *Comparing Transit-Oriented Development Sites by Walkability Indicators*.
- Singhal, A., Kamga, C., & Yazici, A. (2014). *Impact of weather on urban transit ridership*.
- Sohn, K., & Shim, H. (2010). *Factors generating boardings at Metro stations in the Seoul metropolitan area*.
- Spierenburg, L., van Lint, H., & van Oort, N. (2024). *Synergizing cycling and transit : Strategic placement of cycling infrastructure to enhance job accessibility*.
- Statistics Canada. (2021). *2021 Census of Population* [Jeu de données].
- Statistics Canada. (2022). *Automotive Statistics* [Jeu de données].
- Statistics Japan. (2019). *Passenger Cars Registered* [Jeu de données].
- Statistique Canada. (2016). *Déplacement domicile-travail : Faits saillants du Recensement de 2016* [Jeu de données].
- Statistique Canada. (2023). *Statistique du transport de passagers par autobus et le transport urbain, selon le Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN) (x 1 000 000)* [Jeu de données]. <https://doi.org/10.25318/2310025101-fra>
- Steg, L. (2004). *Car use : Lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use*.
- Stover, V., & McCormack, E. (2012). *The Impact of Weather on Bus Ridership in Pierce County, Washington*.
- Syeed, K., & Bunker, J. (2015). *Adverse weather effects on bus ridership*.
- SYTRAL. (s. d.). *Enquête déplacements 2015 de l'aire métropolitaine lyonnaise*.
- Taras, G. (2012). *Straphanger : Saving our cities and ourselves from the automobile* (1 st ed.). New York : Times Books.
- Thomas, T., Jaarsma, R., & Tutert, S. I. A. (2009). *Temporal variations of bicycle demand in the Netherlands : The influence of weather on cycling*.
- Tilahun, N., Levinson, D., & Krizek, K. (2007). *Trails, lanes, or traffic : Valuing bicycle facilities with an adaptive stated preference survey*.
- Tsapakis, I., Cheng, T., & Bolbol, A. (2013). *Impact of weather conditions on macroscopic urban travel times*.
- Tushar, S., & Buehler, R. (2024). *Bikeshare–Metrorail Integration in Washington, D.C. : What are the Characteristics of Neighborhoods that Encourage Capital Bikeshare Trips to and from the Metrorail?*

- United Nations Conference on Environment and Development. (1992). *Declaration of Rio on Environment and Development*.
- Urry, J. (2006). *Inhabiting the car*.
- U.S. Census Bureau. (2024). *Car Ownership Statistics 2024* [Jeu de données].
- van Kempen, E. E. M. M., Kruize, H., Boshuizen, H. C., Ameling, C. B., Staatsen, B. A. M., & de Hollander, A. E. M. (2002). *The association between noise exposure and blood pressure and ischemic heart disease : A meta-analysis*.
- Vanky, A., Verma, S., Courtney, T., Santi, P., & Ratti, C. (2017). *Effect of weather on pedestrian trip count and duration : City-scale evaluations using mobile phone application data*.
- van Lierop, D. S., Lee, B., & El-Geneidy, A. (2014). *Secure Investment for Active Transport : Willingness to Pay for Secure Bicycle Parking in Montreal, Canada*.
- Vedel, S., Jacobsen, J., & Skov-Petersen, H. (2017). *Bicyclists' preferences for route characteristics and crowding in Copenhagen – A choice experiment study of commuters*.
- Vélo Québec. (2020a). *L'état du vélo à Montréal en 2020*.
- Vélo Québec. (2020b). *L'état du vélo au Québec en 2020*.
- Ville de Montréal. (2023). *Budget 2023 et PDI 2023-2032*.
- Ville de Montréal. (2016). *Politique de stationnement*.
- Ville de Québec. (2023). *Vision de la mobilité active 2023-2027*.
- Ville de Québec, & Firme de sondage « Léger ». (2022). *Confort des liens cyclables—Sondage auprès des citoyens de Québec*.
- Vingaard Olesen, A., Osmann Madsen, T. K., Hels, T., & Lahrman, H. (2021). *Single-bicycle crashes : An in-depth analysis of self-reported crashes and estimation of attributable hospital cost*.
- W. Allen, R., & D. Adar, S. (2011). *Are both air pollution and noise driving adverse cardiovascular health effects from motor vehicles?*
- Wang, Z., Zhu, X., Du, Y., & Dou, S. (2024). *A Decision Method for the Catchment Area of Subway Station Under the Difference of Connection Modes*.
- Wergin, J., & Buehler, R. (2017). *Where Do Bikeshare Bikes Actually Go? : Analysis of Capital Bikeshare Trips with GPS Data*.
- Winters, M., Davidson, G., Kao, D., & Teschke, K. (2010). *Motivators and deterrents of bicycling : Comparing influences on decisions to ride*.

- Winters, M., Zanotto, M., & Butler, G. (2020). *The Canadian Bikeway Comfort and Safety (Can-BICS) Classification System : A common naming convention for cycling infrastructure.*
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Notre avenir à tous.*
- World Health Organization. (2018). *Global Status Report on Road Safety 2018.*
- Xie, Y., Jon Smart, M., & Noland, R. (2024). *Powering bikeshare in New York City : Does the usage of e-bikes differ from regular bikes?*
- Yuan, S., Yang, J., Zhang, Y., & Dai, W. (2024). *Impact of Metro Surroundings on Dockless Bike-Sharing Integration by Adaptive Catchment Area.*
- Zhang, C., Du, B., Shen, J., & Xu, X. (2022). *Empirical Investigation on Conflicts between Bus Passengers and Cyclists at Different Types of Bus Stops.*
- Zhao, D., Wang, W., Zheng, Y., Ji, Y., Wang, W., & Hu, X. (2014). *Evaluation of Interactions Between Buses and Bicycles at Stops.*
- Zhao, Y., Wu, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2023). *Analysis and Prediction of Dockless Shared Bike Demand Evolving Around Urban Rail Transit Stations : Case Study in Shenzhen, China.*
- Zheng, N., & Geroliminis, N. (2013). *On the distribution of urban road space for multimodal congested networks.*
- Zhu, Y., & Ma, H. (2023). *Which strategy among avoid, shift, or improve is the best to reduce CO2 emissions from sand and gravel aggregate transportation?*
- Zuo, T. (2020). *Synthetic Modeling Analytics of Bike-Transit Integration over Auto-Dependent Infrastructural System.*
- Zuo, T., Wei, H., Chen, N., & Chun Zhang. (2020). *First-and-last mile solution via bicycling to improving transit accessibility and advancing transportation equity.*

ANNEXE A DIAGRAMME DES INTERACTIONS DE LA VARIABLE USE_ROADS DANS L'ALGORITHME UTILISÉ PAR VALHALLA

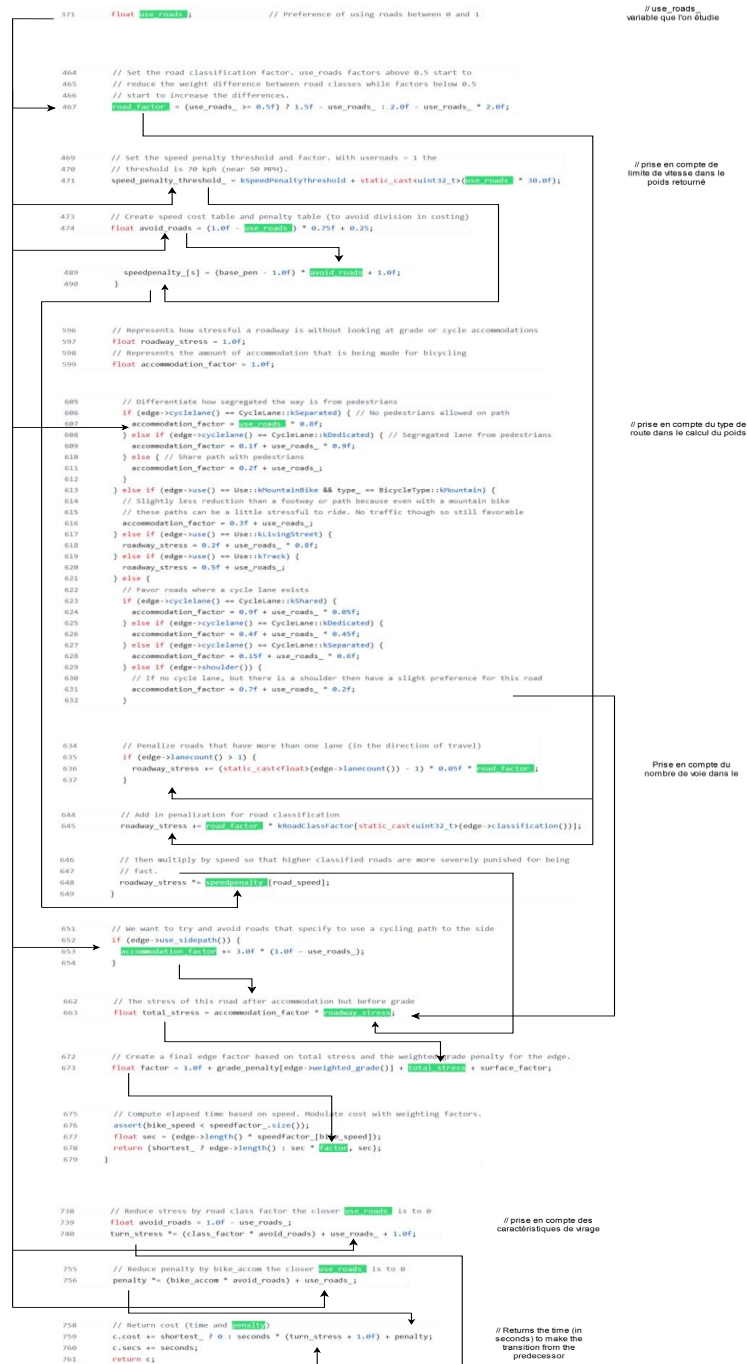


Figure A.1 Diagramme des interactions de la variable use_roads dans l'algorithme utilisé par valhalla

ANNEXE B MANIPULATIONS RÉALISÉES AVEC LE CALCULATEUR VALHALLA

Introduction

L'annexe présente en détail les manipulations réalisées avec l'outil Valhalla, un moteur de calcul d'itinéraires open source, utilisé dans cette étude pour générer des isochrones d'accès à vélo autour des points clés du réseau de transport en commun de Montréal. L'objectif de ces manipulations est double. Premièrement, elles visent à examiner comment différentes configurations du paramètre `use_roads` influencent l'accessibilité cycliste, en particulier la tolérance des cyclistes à partager l'espace avec les automobiles. Deuxièmement, en comparant les isochrones générées à partir de différentes valeurs de ce paramètre, cette étude cherche à évaluer la sensibilité des isochrones à ces variations et à identifier les secteurs où une amélioration du confort cycliste pourrait avoir un impact significatif.

Configuration de Valhalla

Pour cette étude, Valhalla a été utilisé en tant que plugin intégré dans l'environnement QGIS, une fonctionnalité qui facilite la manipulation des données géospatiales et l'analyse des résultats.

La configuration clé de notre utilisation de Valhalla concerne le paramètre `use_roads`, essentiel pour analyser l'impact du confort cyclable sur l'accessibilité des itinéraires. Pour notre étude, les isochrones ont été calculés à deux reprises pour chaque nœud de transport en commun analysé. La première série d'isochrones a été générée en configurant `use_roads` à 0, illustrant un scénario où les cyclistes préfèrent fortement les pistes dédiées et évitent les routes partagées avec les voitures. La deuxième série a été produite avec `use_roads` réglé à 1, représentant un scénario où les cyclistes sont indifférents à la cohabitation avec les automobiles, maximisant ainsi l'utilisation des infrastructures routières existantes.

Ces deux configurations permettent d'obtenir deux ensembles distincts d'isochrones pour chaque point étudié. Cette approche comparative permet d'étudier la sensibilité des bassins d'accessibilité cycliste aux modifications des paramètres de confort et de sécurité sur les itinéraires proposés par Valhalla.

Procédure de calcul

Pour cette étude, les isochrones ont été calculées en prenant comme points de départ les édicules des stations de métro, qui ont été extraits des données OpenStreetMap à l'aide du plugin QuickOSM dans QGIS.

Les isochrones ont été générées pour des durées de trajet de 5, 10, et 15 minutes. Nous choisissons de calculer des isochrones plutôt que des isodistances car le calculateur de Valhalla utilise des notions de temps et de vitesse pour ajuster les itinéraires en fonction des paramètres de confort cyclable, rendant les isodistances (surfaces accessibles pour une distance réseau donnée) moins pertinentes pour notre analyse avec cet outil.

Dans les cas où une station de métro possède plusieurs entrées, une isochrone est calculée pour chaque édicule individuellement. Par la suite, pour obtenir une vue d'ensemble de l'aire de couverture de chaque station, une union des surfaces résultantes des isochrones individuelles est réalisée, formant ainsi l'aire totale accessible depuis n'importe quelle entrée de la station. Cette méthode permet d'assurer que l'accessibilité est évaluée de manière exhaustive pour chaque station (Chekir, 2023).

L'analyse des résultats se déroule en deux étapes principales :

Union Spatiale de tout le réseau : Une union spatiale est réalisée entre les isochrones de chaque édicule pour illustrer l'accès global au réseau de métro.

Analyse Station par Station : Pour détailler les différences d'accessibilité entre les stations, une analyse comparative station par station est effectuée, permettant de déterminer les variations d'accessibilité cyclable entre les stations.

Union spatiale de tout le réseau

Pour cette partie, nous avons superposé les deux ensembles d'isochrones générées avec les valeurs `use_roads` de 0 et 1, afin d'effectuer une soustraction spatiale.

L'analyse a révélé des variations significatives dans la superficie des zones accessibles à vélo depuis les édicules des stations de métro pour les durées de 5, 10 et 15 minutes.

Tableau B.1 Surfaces des zones accessibles pour différentes valeurs du paramètre *use_roads* et différents pas de temps

	Surface (km ²)	Variation de surface
Isochrone 5 min (<i>use_roads</i> = 0)	86, 484	16,2 %
Isochrone 5 min (<i>use_roads</i> = 1)	100, 486	
Isochrone 10 min (<i>use_roads</i> = 0)	181,439	16,0 %
Isochrone 10 min (<i>use_roads</i> = 1)	210,487	
Isochrone 15 min (<i>use_roads</i> = 0)	263,229	14,9 %
Isochrone 15 min (<i>use_roads</i> = 1)	302,333	

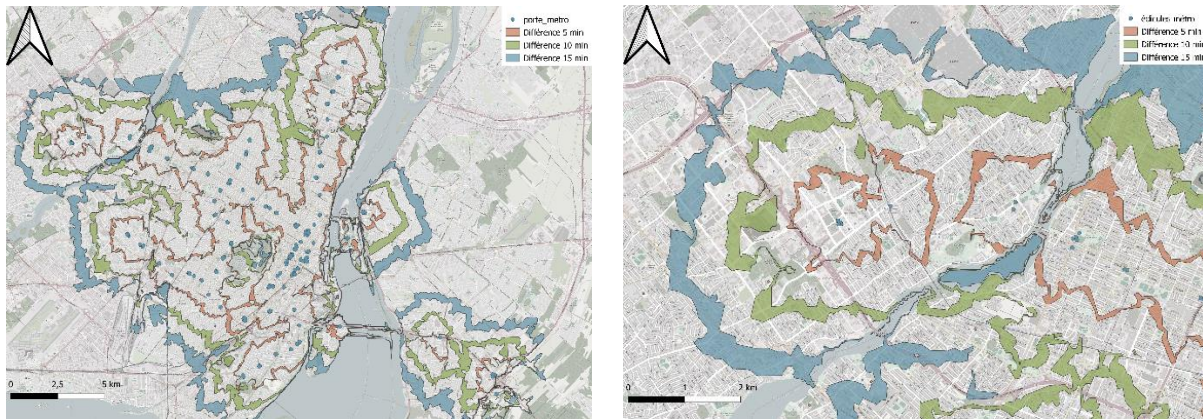


Figure B.1 Différence entre les isochrones en fonction de la valeur du paramètre *use_roads*

Pour les 3 durées étudiées, la surface accessible à vélo depuis les édicules de métro est entre 15% et 16 % supérieures en utilisant une valeur du paramètre *use_roads* = 1, par rapport à celle accessible en utilisant une valeur de *use_roads* = 0. Ceci permet de se rendre compte de la diminution de la surface accessible, si on considère un cycliste avec une préférence pour emprunter les pistes cyclables et éviter les routes les plus larges, sans aménagement adaptés aux cyclistes, contre un calcul effectué pour un cycliste moins dérangé de partager la route avec des automobiles.

Une étude détaillée de l'utilisation des sols sur les territoires affectés par cette variation a montré que la majorité des zones impactées sont résidentielles. Pour la durée de 10 minutes, 58% de la surface est résidentielle, 16% concerne de l'industrie, 11% des espaces verts ou de récréation, 8% des activités diversifiées, et 15% pour les différents autres secteurs.

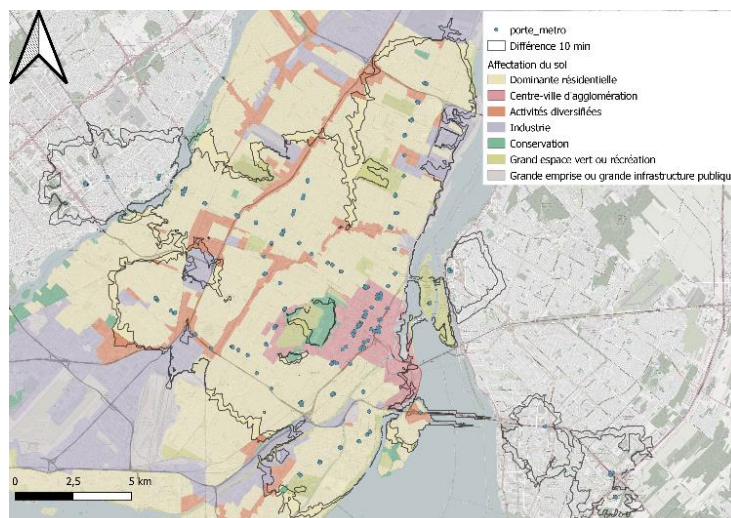


Figure B.2 Utilisation du territoire

La densité de population autour des lignes de métro à Montréal est un indicateur clé démontrant l'utilité potentielle des améliorations du réseau cyclable. Dans le centre-ville, la densité atteint environ 150 logements par hectare brut, tandis que sur la branche Est de la ligne Verte et le segment de la ligne Orange entre les stations Jean Talon et Sherbrooke, elle est de 110 logements par hectare brut. Aux abords des autres stations du réseau, la densité est généralement de 80 logements par hectare, diminuant jusqu'à 60 logements par hectare à mesure que l'on s'éloigne des lignes de métro. Les isochrones révèlent que ces zones de haute densité se situent majoritairement à moins de 10 minutes à vélo des stations, illustrant que, lors des déplacements à vélo, une part significative de la population habite à proximité des stations. Cela souligne l'importance de l'amélioration du réseau cyclable autour des lignes de métro, non seulement pour augmenter l'accessibilité mais aussi pour servir efficacement une large portion de la population.

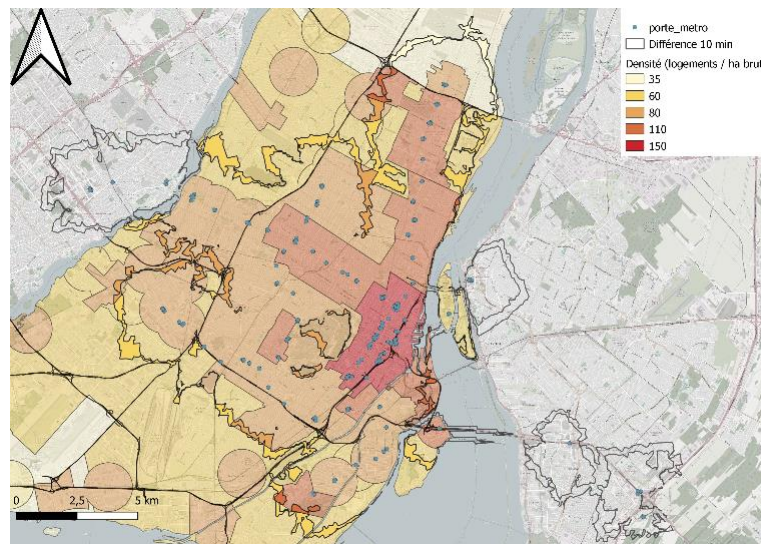


Figure B.3 Densité de ménages

L'union des surfaces accessibles à partir de chaque station de métro permet de déterminer quelle proportion de la population vit dans ces isochrones. Pour ce faire, nous avons utilisé trois types de données : le polygone représentant l'union des isochrones de 10 minutes obtenues avec Valhalla, les fichiers de définition des aires de diffusion de Statistique Canada, et les données du recensement canadien de 2021. Ces isochrones ont été générées en utilisant le mode vélo du calculateur Valhalla avec le paramètre `use_roads` réglé par défaut à 0,5.

La méthode employée implique l'utilisation de QGIS pour joindre les fichiers spatiaux des aires de diffusion avec les données de recensement, suivie d'une sélection des aires de diffusion incluses dans les isochrones à l'aide de l'outil 'Intersection'.

La population totale a été calculée pour les zones sélectionnées, bien que cette méthode tende à surévaluer légèrement la population, car elle compte intégralement les aires de diffusion même si elles sont seulement partiellement contenues dans les isochrones.

Une seconde méthode a donc été appliquée pour ajuster cette estimation en fonction de la proportion réelle de la surface de chaque aire de diffusion incluse dans les isochrones.

Concrètement, la population présente dans les AD est multipliée par le ratio $\frac{\text{Surface AD finale}}{\text{Surface AD initiale}}$.

Ainsi les AD complètement comprises dans l'isochrone ne sont pas modifiées, tandis que la population de celles partiellement comprises est modifiée en fonction de la surface prise dans l'isochrone.

Cette approche plus nuancée, qui suppose une distribution uniforme des habitants dans chaque aire de diffusion, a révélé des différences notables entre les deux méthodes, avec des écarts allant de 6,4% à 20,6%.

On présente seulement les résultats pour l'île de Montréal. Les résultats sont les suivants :

Tableau B.2 Comparaison des différentes méthodes

Temps de trajet maximal depuis les édicules de métro	Méthode incluant la totalité des AD en bordure du polygone		Méthode avec variation de la population en fonction de la surface comprise dans le polygone		Différence entre les deux méthodes
	Population	% de la population totale de l'île de Montréal	Population	% de la population totale de l'île de Montréal	
5 min	899 642	45,0%	759 147	38,0%	15,6%
10 min	1 259 286	63,0%	1 177 889	58,9%	6,4%
15 min	1 759 365	88,0%	1 395 320	69,8%	20,6%
Population totale de l'île de Montréal	2 000 265	100%	2 002 265	100%	

Les résultats ajustés indiquent que 38,0% de la population de l'île de Montréal vit à moins de 5 minutes à vélo d'une station de métro, 58,9% à moins de 10 minutes, et 69,8% à moins de 15 minutes. Ces données illustrent l'importance de l'accessibilité du réseau de métro pour une large part de la population urbaine.

Analyse station par station

Pour chaque station de métro à Montréal, notre étude a généré deux séries d'isochrones à des intervalles de temps définis, correspondant aux valeurs `use_roads` de 0 et 1. Lorsqu'une station

possède plusieurs édicules, les isochrones de chaque édicule ont été regroupées pour offrir une vue complète de l'accessibilité depuis l'ensemble de la station. Cette méthode a permis d'étudier la variation de la surface accessible déterminée par Valhalla, en fonction de la tolérance des cyclistes à cohabiter avec les véhicules motorisés. L'illustration suivante présente les isochrones obtenues pour certaines stations pour un temps de 10 minutes.

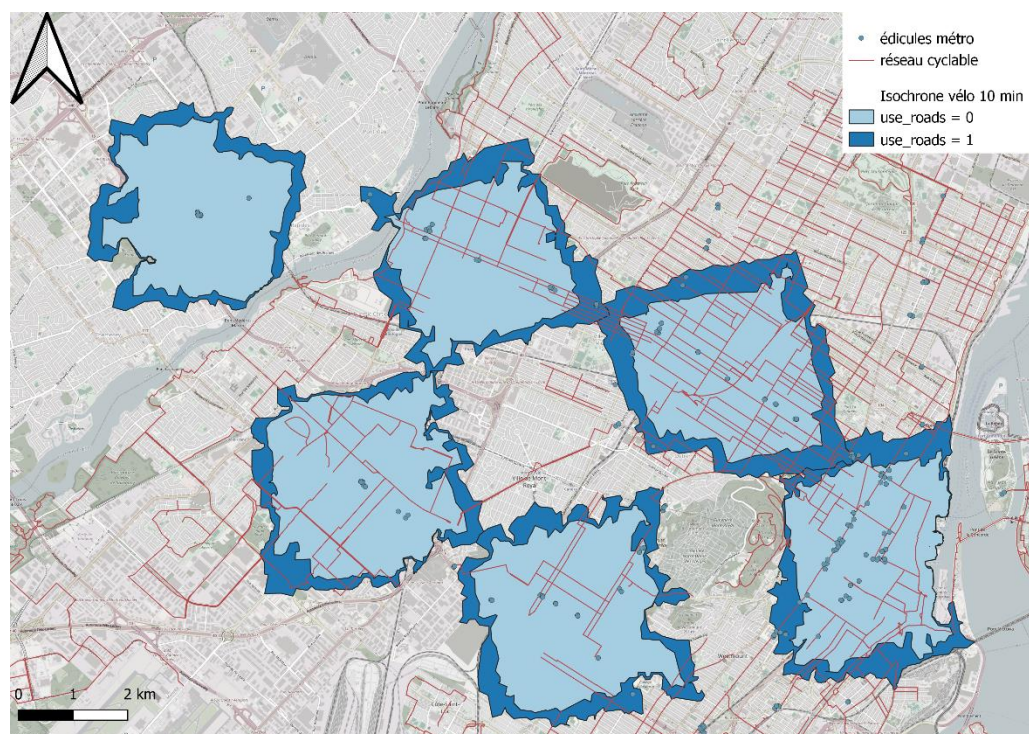


Figure B.4 Variation des surfaces

L'analyse révèle que les stations situées dans des quartiers denses et centraux affichent des variations de surface plus importantes que celles des autres stations lorsque la valeur de `use_roads` est modifiée. Curieusement, ces quartiers centraux possèdent déjà un réseau cyclable bien développé, ce qui devrait théoriquement réduire l'impact de la modification des paramètres de confort cyclable sur l'accessibilité.

Par exemple, dans le Plateau Mont Royal, une forte différence est observée entre les bassins d'attraction calculés avec les deux paramètres de confort cyclable. Cette observation pourrait indiquer que même dans les zones où le réseau cyclable est dense, il existe encore un potentiel

significatif pour des améliorations qui pourraient rendre le réseau encore plus accessible et confortable pour tous les usagers.

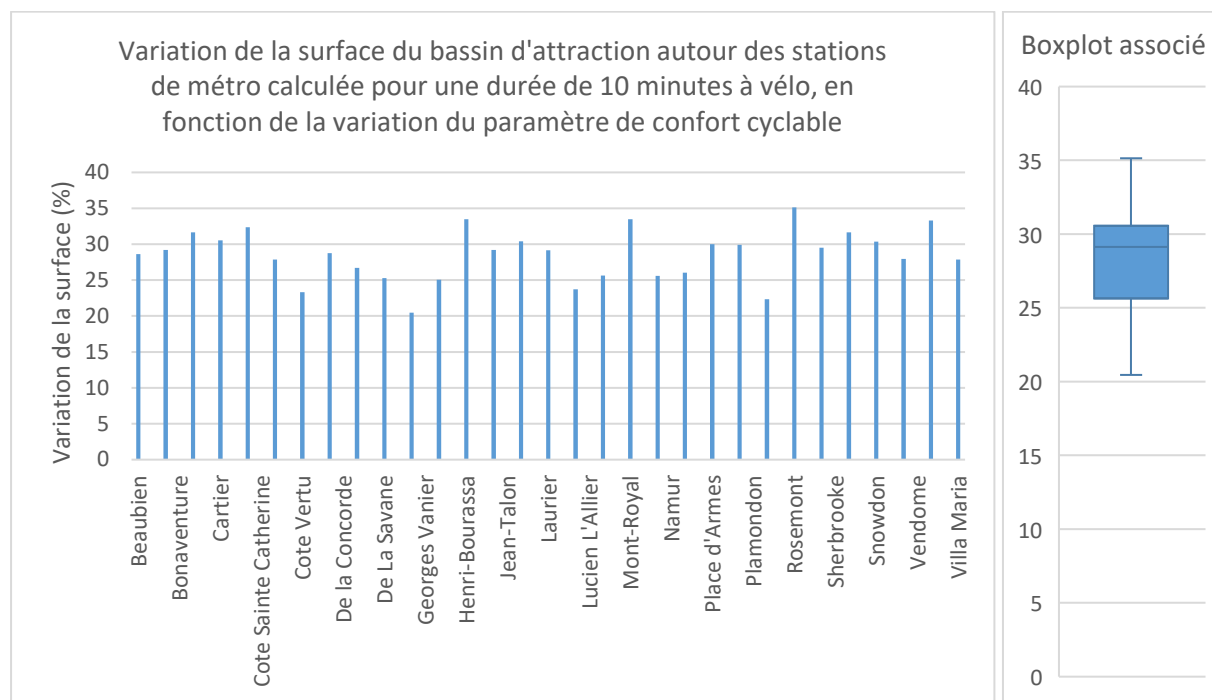


Figure B.5 Variation des surfaces pour chaque station

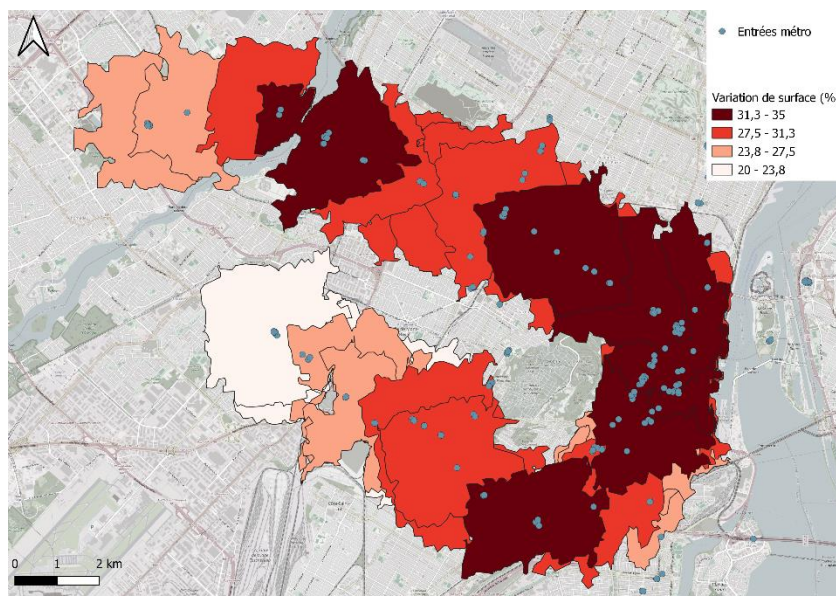


Figure B.6 Intensité de la variation de surface

Une regression linéaire entre la variation de surface et la longueur de piste cyclable contenue dans les isochrones ne montre pas de lien entre ces deux variables.

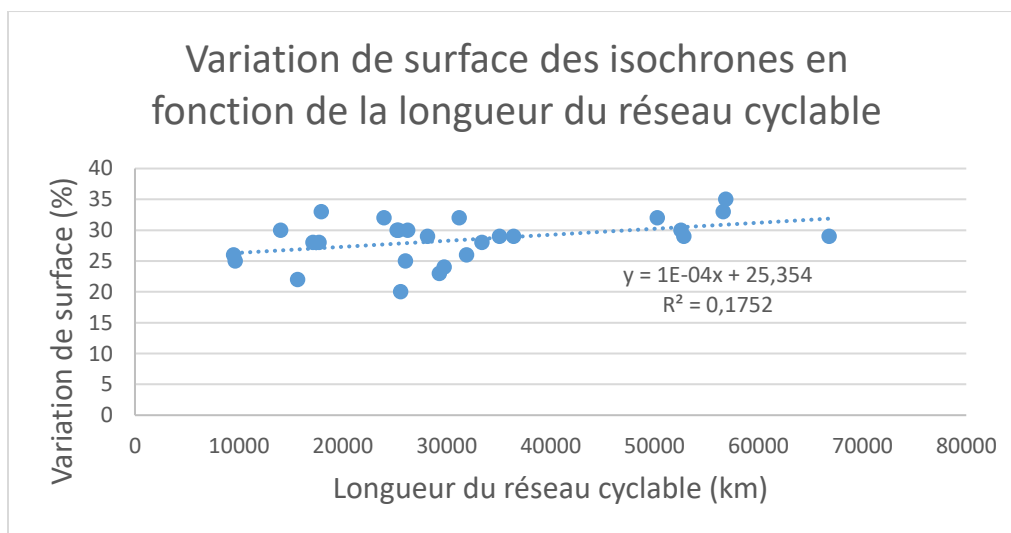


Figure B.7 Analyse de corrélation

Les résultats intrigants de cette analyse remettent en question la capacité du paramètre `use_roads` de Valhalla à déterminer de manière efficace les améliorations potentielles du réseau cyclable. Malgré l'adaptabilité apparente de Valhalla, les variations observées suggèrent que le paramètre `use_roads` peut ne pas capturer pleinement les nuances des interactions entre les cyclistes et le

trafic motorisé. Cette curiosité des résultats souligne un besoin crucial pour un outil plus simple et plus personnalisable et plus intuitif. La recherche d'une alternative à Valhalla qui permette une personnalisation plus poussée des paramètres de confort et de sécurité cyclables est donc une étape nécessaire pour approfondir notre compréhension et notre capacité à planifier des améliorations ciblées et efficaces du réseau cyclable urbain.

ANNEXE C COMPARAISON ENTRE VALHALLA ET L'ALGORITHME D'ANALYSE DE RÉSEAU DE QGIS

Introduction

Dans cette annexe, nous effectuons une comparaison détaillée entre les isochrones générées par deux méthodes différentes : l'algorithme intégré dans QGIS et le calculateur de chemin Valhalla. Cette étude cible dix stations du réseau de métro de Montréal choisies au hasard, à savoir Peel, Du Collège, Plamondon, Viau, Saint Michel, Laurier, Vendôme, Verdun, Henri-Bourassa et Université de Montréal. Pour chaque station, les isochrones sont calculées pour chaque édicule puis regroupés par station. L'objectif est de déterminer quelle méthode fournit des données qui correspondent le mieux aux exigences de notre recherche sur l'accessibilité cyclable universelle.

Méthodologie

Paramètres de calcul

Pour QGIS, les isochrones de 10 minutes sont calculées avec les vitesses suivantes attribuées selon le type de voie : 16 km/h pour le réseau cyclable, 5 km/h pour le réseau routier, et 0 km/h pour les autoroutes. Cette différenciation vise à refléter le comportement d'un cycliste débutant à l'aise seulement sur les tronçons cyclables sécuritaires.

Pour Valhalla, l'isochrone de 10 minutes est également calculé en utilisant une vitesse moyenne de 16 km/h, avec le paramètre `use_roads` réglé sur 1, ce qui suppose une tolérance faible des cyclistes à partager la route avec les automobiles.

Le détail des procédures algorithmiques est disponible dans l'annexe A.

Méthode pour comparer les résultats

Valhalla produit un résultat sous forme de MultiPolygon, tandis que QGIS génère un MultiLineString. Afin de rendre ces résultats comparables, nous convertissons les données dans un format commun. Deux approches sont testées : la conversion des lignes en surfaces par la création d'une zone tampon de 100 mètres autour de chaque ligne, et la mesure de la longueur totale des rues contenues dans l'isochrone de Valhalla. Cette dernière méthode compte uniquement les segments de route (à l'exclusion des autoroutes) situés à l'intérieur du polygone.

Résultats

Une illustration représentative est fournie pour la station Du Collège, illustrant les différences dans les isochrones générées par les deux méthodes.

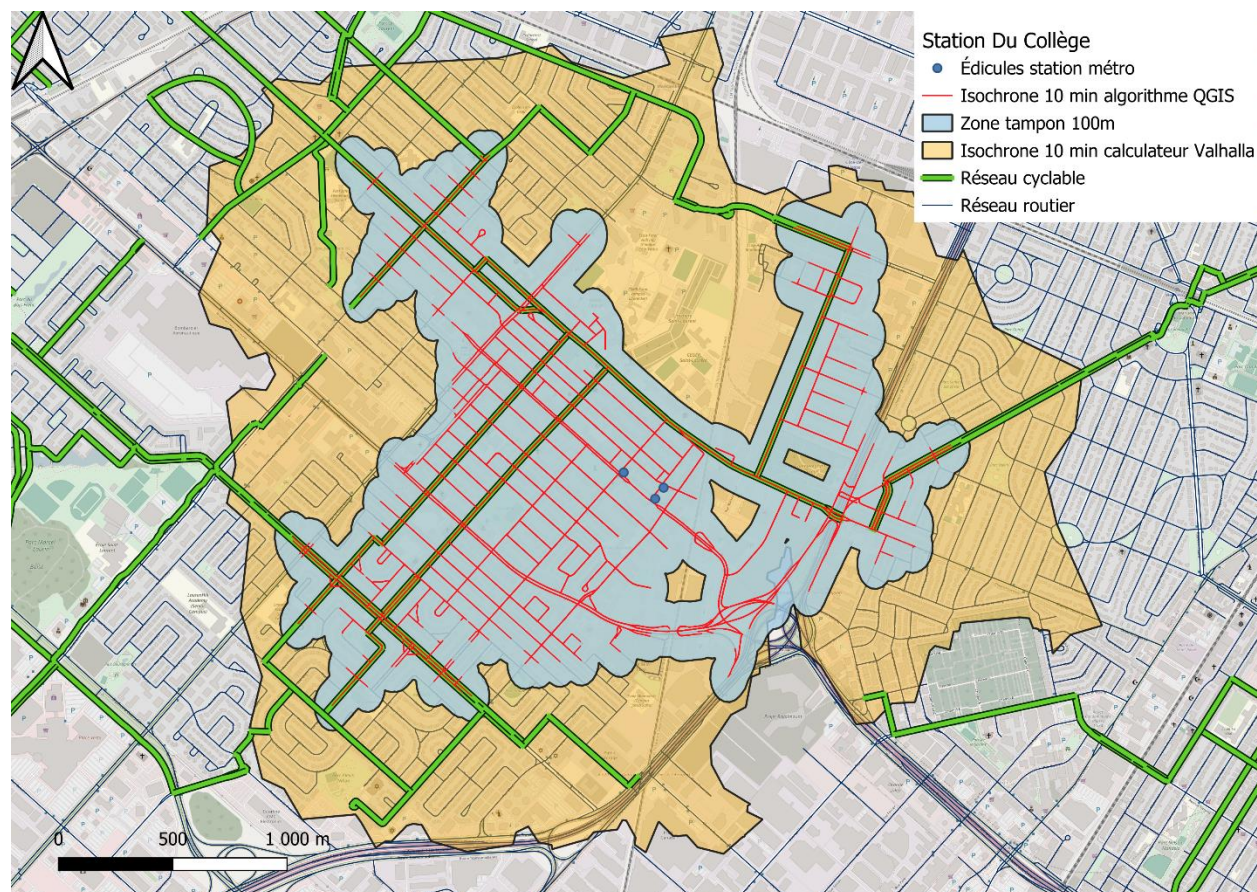


Figure C.1 Différences des isochrones entre les deux méthodes

Les résultats pour les autres stations sont récapitulés dans le tableau suivant, qui compare quantitativement la longueur du réseau routier accessible et la surface couverte par les isochrones pour chaque station :

Tableau C.1 Comparaison entre les méthodes

Station	Longueur du réseau routier (hors autoroutes) (km)				Surface (km ²)		
	Valhalla	QGIS	ER %		Valhalla	QGIS	ER %
Peel	176,1	145,7	17,3		10,2	9,6	6,4
Udem	114,0	45,4	60,1		8,9	4,0	55,1
Henri-Bourassa	115,1	98,6	14,3		9,8	7,3	26,0
Verdun	116,2	92,0	20,9		8,2	7,4	9,5
Vendôme	117,0	94,9	18,9		8,1	7,3	9,7
Laurier	186,3	184,2	1,1		10,2	11,9	-17,1
Saint Michel	172,8	84,0	51,4		10,7	5,7	46,4
Viau	110,1	94,7	14,0		8,0	7,8	2,4
Plamondon	142,6	74,0	48,1		9,9	6,0	39,3
Du Collège	147,2	58,1	60,6		9,9	4,2	57,5

Ces résultats sont présentés dans l'histogramme suivant.

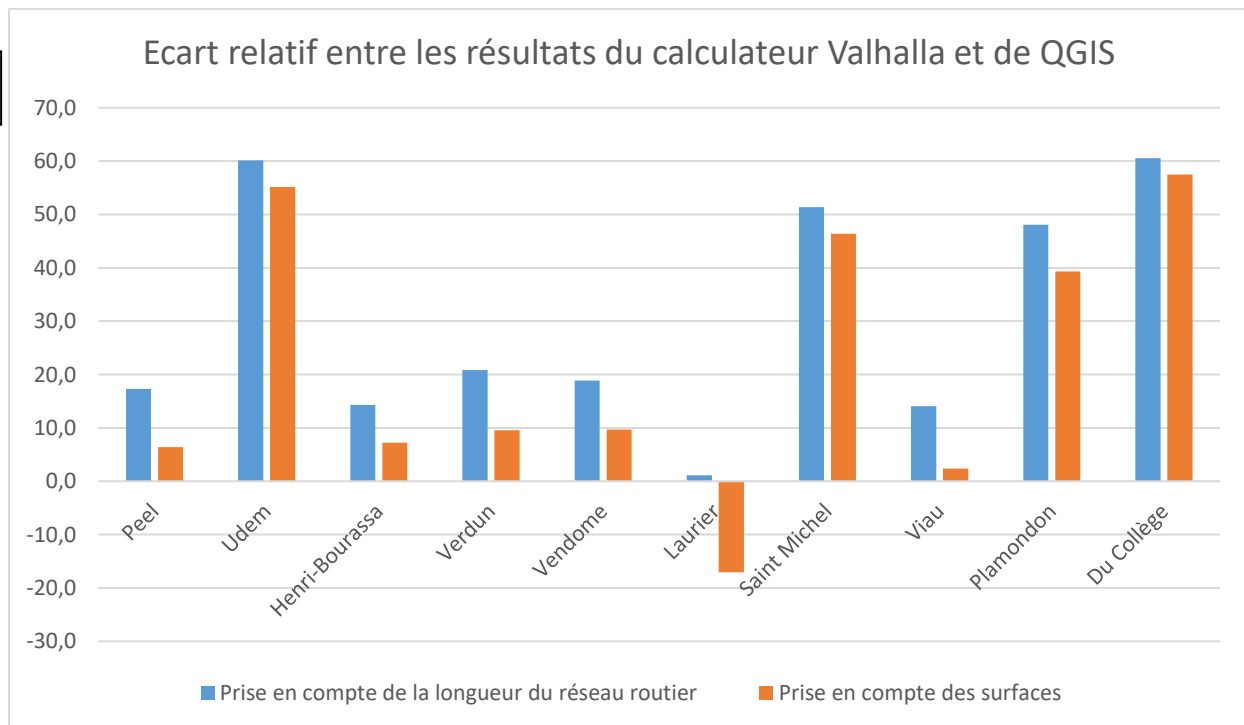


Figure C.2 Ecart relatifs entre les résultats

En examinant les deux méthodes de comparaison, celle qui prend en compte les longueurs du réseau routier montre systématiquement des valeurs supérieures pour Valhalla par rapport à celle qui considère les surfaces des réseaux pour toutes les stations. Cette différence pourrait s'expliquer par la dimension du tampon appliqué autour des lignes obtenues via QGIS. Un tampon de plus de 100 mètres pourrait potentiellement faire correspondre les résultats des deux méthodes de comparaison.

Concernant la comparaison des isochrones calculées avec Valhalla et QGIS, il apparaît que Valhalla produit presque systématiquement des isochrones couvrant une plus grande étendue que ceux générés par QGIS. Selon les stations de métro et les méthodes de calcul utilisées, les isochrones de Valhalla s'étendent de -17,1% à 60,6% de plus que ceux de QGIS, avec une augmentation moyenne de 26,2%. La station Laurier constitue l'unique exception de cet échantillon, où, en termes de surfaces, les isochrones de QGIS surpassent ceux de Valhalla de 17,1%.

Une analyse qualitative des résultats permet de comprendre plus en détail les principaux facteurs influençant cette différence. Dans l'ensemble, on se rend compte que dans les zones où un axe cyclable est présent, les isochrones produites par Valhalla et QGIS sont similaires, permettant des déplacements sur des distances comparables. Par exemple, sur une route droite dotée d'un accès cyclable continu, QGIS peut même couvrir une distance légèrement plus étendue que Valhalla. Cette particularité s'explique par le fait que l'algorithme de QGIS ne pénalise pas les intersections. Toutefois, lorsque les stations ne sont pas directement connectées à un axe cyclable, ou lorsque le réseau cyclable est discontinu, les isochrones générées par QGIS sont nettement plus restreintes que ceux de Valhalla. Cette situation est attendue et voulue puisque les paramètres de QGIS incluent une pénalisation des routes ne faisant pas partie du réseau routier à une vitesse de 5 km/h, affectant ainsi la portée des isochrones dans ces conditions.

Conclusion

L'analyse des isochrones générées par Valhalla et QGIS révèle que ceux produits par Valhalla sont moins affectés par les caractéristiques du réseau cyclable, malgré l'activation du paramètre `use_roads` à la valeur 1. Cette caractéristique se révèle avantageuse pour notre étude, qui se base sur une hypothèse rigoureuse quant à l'accès des cyclistes aux routes non spécifiquement dédiées aux vélos. En conséquence, l'utilisation de l'algorithme d'analyse de réseau de QGIS, avec une

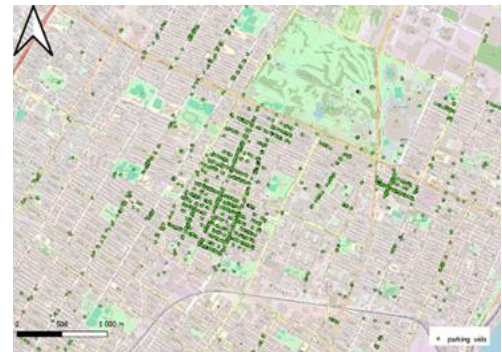
adaptation spécifique des vitesses sur différents types de routes, s'avère être une méthode particulièrement efficace pour évaluer la qualité du réseau cyclable autour des stations de métro. Cette approche permet de prendre en compte de manière précise le confort cyclable, offrant ainsi une mesure plus fidèle de l'accessibilité cyclable universelle aux stations.

ANNEXE D ETUDE DES STATIONNEMENTS VÉLOS DES STATIONS DE LA LIGNE BLEUE

Objectif : On cherche à estimer le temps nécessaire pour sécuriser son vélo avant de rejoindre une station de métro. Pour cela, un comptage des stationnements vélos et de leur distance à la station est nécessaire.

On extraie d'abord les données de stationnement vélo disponibles sur OpenStreetMap, celles-ci ne sont pas complètes et seule une partie des emplacements de stationnement vélo sont renseignés.

On remarque cela dans la figure suivante, dans certains quartiers les stationnements vélos semblent avoir tous été renseignés dans OSM, tandis que pour certaines zones cette donnée est moins consistante.



Cela nous rappelle que les données OSM sont renseignées par une communauté de collaborateurs volontaires, dont les méthodes ne sont pas nécessairement toujours homogènes.

Les contributeurs OpenStreetMap ont pour objectifs de cartographier des informations détaillées sur les routes, les bâtiments, les voies navigables, etc., dans le monde entier.

Les places de stationnement vélo ne sont généralement pas la priorité de ce genre de démarche.

Pour avoir une vue plus claire des stationnements vélo relatifs aux stations de métro, on applique un filtre qui exclut les stationnements vélo situés à plus de 150 m à vol d'oiseau des édicules des stations de métro. On se rend compte que pour une part des stations, aucun emplacement de stationnement vélo n'est renseigné sur OSM dans ce rayon de 150 m. Souvent, quand certains stationnements vélo sont renseignés, on se rend compte qu'ils ne sont pas directement associés à cette entrée de métro, et que la plupart du temps, les stationnements à vélo les plus proches des entrées de métro ne sont pas présent sur OSM.

Méthodologie : Pour avoir une idée des données réels concernant ce type d'infrastructure, on réalise un relevé manuel des distances entre les édicules des stations de la ligne verte du métro de Montréal et les stationnements vélo les plus proches en utilisant Google Maps. La méthodologie est la suivante.

- 1) On se concentre seulement sur les stationnements vélo directement liés à la station de métro, qui sont présents sur le même trottoir que l'édicule étudié.
- 2) On ne considère que les stationnements vélo avec une capacité supérieure à 4 emplacements. Les poteaux où l'on peut attacher 2 vélos ne sont pas pris en compte.
- 3) On s'assure que les photos Open Street View sont récentes et ont été prise en été, quand l'ensemble des infrastructures vélos est normalement déployée à Montréal.

On réalise ce comptage sur la ligne bleue du métro de Montréal car elle a l'avantage de ne pas passer au centre-ville, où les stationnements vélo sont souvent des poteaux en grands nombre éparpillés dans toutes les rues.

Résultats : En considérant la méthodologie, on réalise un comptage pour chaque édicule de la distance avec le stationnement vélo le plus proche. Sur les 27 édicules de la ligne bleue, on obtient les résultats suivants :

- 4 édicules sont en travaux au moment de la prises des photos Google Street View, ils ne sont pas étudiés.
- 11 édicules ont des valeurs similaires entre Google Street View et OpenStreetMap (que ce soient des valeurs de distances similaires, ou les deux sources qui indique une absence de stationnement vélo).
- 11 édicules ont des valeurs OSM qui ne sont pas à jour.
- 1 édicule n'est pas observable avec Google Street Map.

L'échantillon est réduit, donc il n'est pas statistiquement représentatif. Mais avec l'échantillon dont on dispose, on se rend compte que les données OSM sont largement incomplète quand il s'agit des stationnements vélo à Montréal. Elles ont l'avantage d'être facilement accessibles, et ce rapidement quel que soit le territoire étudié. La méthode de comptage manuel en utilisant Google Street Map est fastidieuse mais elle est plus précise. Elle a l'avantage de rendre compte des évènements comme les travaux, mais elle peut aussi dépendre de la date à laquelle a été prise la photo.

Pour les 27 édicules observés, on obtient la répartition suivante, des distances avec le stationnement à vélo le proche :

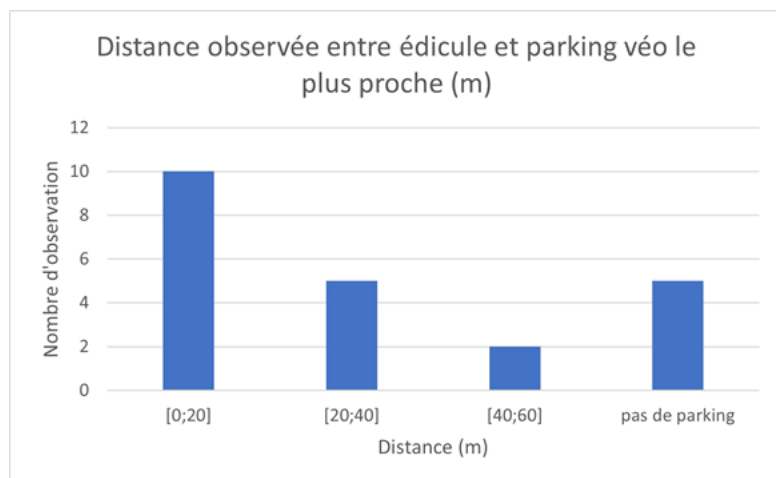


Figure D.2 Distances observées

Ainsi la majorité des stationnements vélo sont à une distance faible des édicules des stations de métro observées. On relève que 5 édicules n'ont pas de stationnement vélo au moment de la prise de photo, cela pourrait constituer une limite de cette hypothèse. Dans l'ensemble il semble judicieux d'attribuer une pénalité de temps moyenne représentant la marche du parking vélo à la station, ainsi que le temps pour attacher son vélo.