

Titre: Analyse de l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des
courtes distances et dans une perspective d'équité sociale : le cas
de Montréal

Auteur: Julien Verdier

Date: 2023

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Verdier, J. (2023). Analyse de l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des
courtes distances et dans une perspective d'équité sociale : le cas de Montréal
[Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/55743/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/55743/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Owen Waygood, & Geneviève Boisjoly
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Analyse de l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des courtes
distances et dans une perspective d'équité sociale : le cas de Montréal**

JULIEN VERDIER

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie civil

Juillet 2023

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Analyse de l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des courtes distances et dans une perspective d'équité sociale : le cas de Montréal

présenté par **Julien VERDIER**

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

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

Nicolas SAUNIER, président

Owen WAYGOOD, membre et directeur de recherche

Geneviève BOISJOLY, membre et codirectrice de recherche

Philippe APPARICIO, membre externe

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier mon directeur de recherche, Owen Waygood, et ma codirectrice de recherche, Geneviève Boisjoly, pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ma maîtrise. Je les remercie pour leur gentillesse et leur disponibilité, et pour tout ce que j'ai pu apprendre à leurs côtés.

Je souhaite également remercier les membres de la Grappe Accessibilité, pour leur contribution à mes travaux et leurs précieux conseils lors de nos réunions de suivi.

Je remercie Mitacs pour avoir contribué à financer mes travaux de recherche, ainsi que la Ville de Montréal, qui a été le point de départ de ce projet et m'a permis d'accéder à de nombreuses données.

Je voudrais remercier mes colocataires, pour leur bonne humeur, leur amour de la musique et pour nos débats à n'en plus finir, dont la présence quotidienne a permis qu'à aucun moment je ne me sente seul. Un merci tout particulier à Mathilde, binôme originel de cette aventure outre-Atlantique.

Enfin, merci à mes parents et à ma petite sœur pour leur soutien indéfectible depuis l'autre côté de l'océan, qui ont su m'apporter beaucoup d'amour et de sérénité.

RÉSUMÉ

L'impact environnemental du secteur des transports est connu, et représente une très grande partie des émissions de gaz à effet de serre au Québec (43.3%), notamment du fait de l'usage de l'automobile. En réponse à ce constat alarmant, le Gouvernement du Québec et la Ville de Montréal ont mis en place des plans directeurs visant à décarboner les transports, en promouvant l'utilisation des modes actifs, et notamment la marche.

Cette situation appelle à une réflexion quant à la nature et à la fonction de l'espace urbain. Le concept de la *ville des courtes distances* fournit pour cela un cadre théorique utile pour construire un espace urbain durable organisé autour d'un système de transport respectueux de l'environnement, porté par le transport en commun et les modes actifs.

Le présent mémoire se donne pour objectif de caractériser les déterminants de l'accessibilité piétonne dans la Ville de Montréal, dans le cadre de la ville des courtes distances, et dans une perspective d'équité sociale.

Pour ce faire, différents indicateurs d'accessibilité piétonne au niveau des îlots de diffusion sont générés, vers six types de destinations : la culture, la santé et les services sociaux, l'éducation, les zones commerciales, les commerces alimentaires et les activités sportives et récréatives. La méthode des opportunités cumulées est employée, en fixant un seuil de 15 minutes de marche, seuil au-delà duquel l'accessibilité est considérée comme nulle. Ces premiers résultats permettent d'évaluer la répartition spatiale de l'accessibilité piétonne.

Les indicateurs d'accessibilité fournissent les données de base pour l'étape suivante : l'identification des déterminants de l'accessibilité piétonne. Tout d'abord, la méthode de regroupement (*clustering*) du *k-moyennes* aboutit à la création de quatre classes, qui représentent quatre types de quartier au regard du niveau d'accessibilité piétonne aux différentes destinations. Ensuite, plusieurs modèles de régression multinomiale logistique sont construits, et permettent de mettre en lumière les facteurs de l'environnement bâti et de l'environnement social qui influencent le niveau d'accessibilité : ces derniers permettent d'évaluer l'impact de chaque variable sur la probabilité qu'un îlot de diffusion appartienne à chaque classe. Les modèles démontrent l'importance d'un environnement bâti dense et diversifié, favorables à l'accessibilité piétonne, et semblent présenter l'éducation comme un facteur fortement lié à l'accessibilité.

Enfin, une analyse de l'équité est menée, à travers deux volets : l'équité horizontale et l'équité verticale. L'équité horizontale permet de mettre en avant l'inégalité de la distribution de l'accessibilité piétonne sur le territoire, en particulier pour la culture, les zones commerciales et les commerces alimentaires, mettant en exergue un manque de continuité de l'accessibilité au sein de l'espace urbain. L'équité verticale repose quant à elle sur l'identification des populations défavorisées, afin d'étudier dans quelle mesure ces populations bénéficient d'une meilleure accessibilité au vu de leur situation. Cette distinction est faite sur la base du revenu moyen des ménages, et permet de catégoriser la population : les ménages à revenu faible, à revenu moyen et à revenu élevé. Les résultats montrent que les ménages les moins aisés bénéficient globalement d'une meilleure accessibilité piétonne, et montrent également que la distribution de l'accessibilité au sein même de chaque catégorie est la plus équitable parmi les personnes les plus défavorisées. Ces constats semblent positifs dans l'ensemble, dans la mesure où le but de l'équité verticale est de compenser la situation des plus vulnérables par un traitement de faveur, ici en matière d'accessibilité. Il est néanmoins important de nuancer ces propos au regard de la situation de Montréal, qui encourage encore aujourd'hui l'usage de l'automobile du fait de son organisation urbaine, ce qui désavantage inévitablement ceux qui ne peuvent pas assumer le coût d'une voiture. Ce mémoire permet donc de dresser une analyse de l'accessibilité piétonne à Montréal, comblant ainsi certaines lacunes de la littérature. Ce dernier fournit un cadre méthodologique pour de futures recherches sur Montréal ou d'autres villes, et ouvre la porte à des études plus avancées sur le sujet, dans le but de populariser l'accessibilité piétonne et le modèle de la ville des courtes distances.

ABSTRACT

The environmental impact of the transport sector is well known, and it accounts for a very large proportion of greenhouse gas emissions in Quebec (43.3%), particularly as a result of car use. In response to this alarming situation, the Government of Quebec and the City of Montreal have put in place strategic plans aimed at decarbonising transport, by promoting the use of active modes of transport, and notably walking.

This situation calls for a rethink of the nature and function of urban space. The concept of the *city of short distances* provides a useful theoretical framework for building a sustainable urban space organised around an environmentally friendly transport system, driven by public transport and active modes of transport.

The aim of this research project is to characterise the determinants of pedestrian accessibility in the City of Montreal, in the context of the city of short distances, and from a social equity perspective.

To do this, various indicators of pedestrian accessibility at the level of dissemination blocks are generated, towards six types of destination: culture, health and social services, education, commercial zones, food stores and sports and recreational activities. The cumulative opportunities method is used, setting a threshold of 15 minutes' walk, beyond which accessibility is considered to be zero. These initial results make it possible to assess the spatial distribution of pedestrian accessibility.

These accessibility indicators provide the basic data for the next stage: identifying the determinants of pedestrian accessibility. Firstly, the k-means clustering method is used to create four clusters, representing four types of neighbourhoods in terms of the level of pedestrian accessibility to the different destinations. Next, several multinomial logistic regression models were constructed, highlighting the factors in the built and social environments that influence the level of accessibility: these make it possible to assess the impact of each variable on the probability of a diffusion block belonging to each cluster. The models demonstrate the importance of a dense and diverse built environment, favourable to pedestrian accessibility, and appear to present education as a factor strongly associated with accessibility.

Finally, an analysis of equity is carried out, in two parts: horizontal equity and vertical equity. Horizontal equity reveals the uneven distribution of pedestrian accessibility across the area,

particularly for culture, commercial zones, and food stores, pointing to a lack of continuity of accessibility within the urban space. Vertical equity is based on the identification of disadvantaged populations, in order to study the extent to which these populations benefit from better accessibility given their situation. This distinction is made based on average household income and makes it possible to categorise the population into low-income, middle-income, and high-income households. The results show that the least affluent households benefit overall from better pedestrian accessibility and indicate that the distribution of accessibility within each category is most equitable among the most underprivileged. Overall, these findings seem positive, insofar as the aim of vertical equity is to compensate for the situation of the most vulnerable by giving them preferential treatment, in this case in terms of accessibility. However, it is important to temper these observations with the situation in Montreal, where urban organisation still encourages car use, which inevitably puts those who cannot afford a car at a disadvantage.

This study therefore provides an analysis of pedestrian accessibility in Montreal, filling in some of the gaps in the literature. It provides a methodological framework for future research on Montreal or other cities and paves the way for more advanced studies on the subject, with the aim of popularising pedestrian accessibility and the model of the city of short distances.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectifs de la recherche	4
1.4 Structure du mémoire	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	6
2.1 Le concept de la ville des courtes distances	6
2.1.1 Le modèle général de la ville durable	6
2.1.2 La ville des courtes distances	13
2.2 Mobilité et accessibilité : deux notions distinctes	14
2.3 Mesurer l'accessibilité.....	15
2.3.1 Mesures basées sur l'infrastructure	15
2.3.2 Mesures basées sur la localisation.....	15
2.3.3 Mesures basées sur l'individu	17
2.3.4 Mesures basées sur l'utilité	18
2.3.5 Types de distances.....	18

2.4	L'équité sociale	18
2.4.1	Définitions générales.....	19
2.4.2	Mesurer l'équité horizontale	19
2.4.3	Mesurer l'équité verticale.....	21
CHAPITRE 3	DÉMARCHE DU TRAVAIL DE RECHERCHE	22
CHAPITRE 4	L'ACCESSIBILITÉ PIÉTONNE À MONTRÉAL	25
4.1	Présentation du territoire soumis à l'étude	25
4.1.1	Limites géographiques de la Ville de Montréal	25
4.1.2	Échelle des îlots de diffusion	26
4.1.3	Utilisation du sol	26
4.2	Données et méthodes.....	28
4.2.1	Collecte et traitement des données	28
4.2.2	Élaboration de la typologie de destinations.....	33
4.2.3	Mesure de l'accessibilité piétonne aux destinations	34
4.3	Résultats et discussion.....	37
4.3.1	Statistiques descriptives des scores d'accessibilité	37
4.3.2	Cartes d'accessibilité.....	39
CHAPITRE 5	ARTICLE 1 : PEDESTRIAN ACCESSIBILITY IN MONTREAL: THE DETERMINING FACTORS AND THE LEVEL OF SOCIAL EQUITY.....	47
5.1	Abstract	48
5.2	Introduction	49
5.3	Background literature	50
5.3.1	Accessibility measures	50
5.3.2	Equity in transport.....	51
5.4	Case study	52

5.5	Methods.....	53
5.5.1	Data collection.....	53
5.5.2	Typology of destinations.....	54
5.5.3	Accessibility measure.....	55
5.5.4	Cluster analysis	57
5.5.5	Multinomial Logit Model.....	57
5.5.6	Equity assessment	60
5.6	Results	61
5.6.1	Clusters.....	61
5.6.2	Built and social environment characteristics of the clusters	63
5.6.3	Multinomial Logistic regression analysis	64
5.6.4	Equity	67
5.7	Discussion	72
5.8	Conclusion.....	73
5.9	Acknowledgments.....	74
5.10	Author contributions	74
CHAPITRE 6	DISCUSSION GÉNÉRALE	75
CHAPITRE 7	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	78
7.1	Synthèse des travaux de recherche.....	78
7.2	Contributions de la recherche.....	80
7.3	Limites de la méthodologie	81
7.4	Recommandations	82
7.5	Perspectives.....	83
RÉFÉRENCES.....		85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 Description des destinations prises en compte dans l'étude.....	29
Tableau 4.2 Typologie de destinations.....	33
Tableau 4.3 Nombre d'opportunités accessibles depuis les îlots de diffusion, pour chaque catégorie de destination.....	38
Table 5.1 Typology of destinations	54
Table 5.2 Summary statistics	58
Table 5.3 Built and social environments of the four clusters (means)	64
Table 5.4 Results of the multinomial logistic (MNL) regressions modelling the influence of each explanatory variable on the likelihood to belong to the different clusters	65

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Exemple de représentation graphique d'une courbe de Lorenz pour la distribution du revenu au sein d'une population (source : Julien Verdier).....	20
Figure 3.1 Méthodologie générale du travail de recherche	23
Figure 4.1 Carte du territoire à l'étude	25
Figure 4.2 Carte des différents usages du sol	27
Figure 4.3 Description schématique de la mesure de l'accessibilité utilisée dans l'étude (source : Julien Verdier).....	35
Figure 4.4 Graphiques en violons des indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations	39
Figure 4.5 Carte de l'accessibilité piétonne à la culture	40
Figure 4.6 Carte de l'accessibilité piétonne à la santé et aux services sociaux.....	41
Figure 4.7 Carte de l'accessibilité piétonne à l'éducation	43
Figure 4.8 Carte de l'accessibilité piétonne aux zones commerciales	44
Figure 4.9 Carte de l'accessibilité piétonne aux commerces alimentaires.....	45
Figure 4.10 Carte de l'accessibilité piétonne aux activités sportives et récréatives.....	46
Figure 5.1 Map of the study area.....	53
Figure 5.2 Relation between dissemination blocks and dissemination areas.....	57
Figure 5.3 Land use mix maps for entropy (top left), Herfindahl-Hirschman index (top right) and the interaction method (bottom left).....	60
Figure 5.4 Geographical distribution of the clusters	62
Figure 5.5 Z-score of accessibility indicators by cluster.....	63
Figure 5.6 Lorenz curves for horizontal equity assessment (for each destination)	68
Figure 5.7 Map of the income level of households	69
Figure 5.8 Average accessibility to destinations by income level	70
Figure 5.9 Lorenz curves for vertical equity (for each destination).....	71

Figure 5.10 Gini coefficients for different household income levels.....	71
Figure 6.1 Matrice de corrélations (Spearman) des niveaux d'accessibilité piétonne aux catégories de destinations	76

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ANOVA	Analysis of variance
ARTM	Autorité régionale de transport métropolitain
CHASS	Computing in the Humanities and Social Sciences
CPE	Centre de la petite enfance
DMTI	Desktop Mapping Technologies Inc.
MELCCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MNL	Multinomial Logit Model
OSM	OpenStreetMap
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
.shp	Shapefile
SIC	Standard Industrial Classification
StatCan	Statistique Canada
SYTRAL	Syndicat mixte des transports pour le Rhône et l'agglomération lyonnaise

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Ce chapitre vise à dresser un portrait du contexte actuel dans lequel s’inscrit le projet, d’y exposer la problématique, pour évoquer ensuite les différents objectifs de la recherche, la méthodologie générale envisagée, et finalement présenter la structure du mémoire.

1.1 Mise en contexte

Le domaine des transports est au centre des questions actuellement débattues dans la société. En effet, le transport génère à lui seul plus de 43% des émissions de gaz à effet de serre du Québec en 2019, ce qui en faisait le secteur d’activité le plus polluant (MELCCC, 2021a, 2021b). De plus, les véhicules légers (voitures et camions légers) représentaient au sein des transports la plus grande source d’émissions (MELCCC, 2021a).

Or, Montréal est une métropole d’Amérique du Nord, construite autour de l’automobile comme le montre l’Enquête Origine-Destination de 2018 (ARTM, 2020) : au sein de l’agglomération de Montréal, la part modale¹ de la voiture s’élève en moyenne à 56%, tandis que celle des modes non motorisés est d’en moyenne 18%. À titre de comparaison, dans la ville de Lyon, en France, la part modale² de l’automobile atteint 17%, et la part modale combinée de la marche et du vélo s’élève à 57% (SYTRAL, 2018).

Dans une perspective de transition énergétique, le Gouvernement du Québec a donc mis en place un *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques*, concernant notamment les volets relatifs à l’aménagement du territoire, ainsi qu’au transport et à la mobilité (Gouvernement du Québec, 2023c). En effet, ce Plan directeur s’est donné comme objectif de créer des formes urbaines qui encouragent l’utilisation du transport en commun et la pratique des modes actifs, tout en internalisant les coûts de développement (Gouvernement du Québec, 2023a). En ce qui concerne le transport, il s’agit notamment de promouvoir les énergies à faible empreinte carbone, couplées à une utilisation efficace des véhicules, et de proposer des options qui remplacent l’usage de l’automobile (Gouvernement du Québec, 2023b).

¹ La part modale est calculée sur une durée de 24 heures, incluant ainsi la pointe du matin, le jour, la pointe de l’après-midi, le soir et la nuit, pour tous les motifs sauf le retour au domicile ; seuls les déplacements produits sont considérés (ARTM, 2020).

² L’enquête de déplacements porte sur des données de 2015, sur le territoire de Lyon-Villeurbanne ; seuls les déplacements internes au secteur sont considérés (SYTRAL, 2018).

À l'échelle locale, la Ville de Montréal a également mis en place un plan d'action qui vise la neutralité carbone des transports d'ici 2040, dont l'un des objectifs consiste à aménager l'espace urbain pour promouvoir les modes actifs, à travers notamment la piétonnisation et la création d'itinéraires cyclables sécuritaires (Ville de Montréal, 2023a).

Dans ce contexte de réhabilitation de l'espace urbain au profit des modes actifs, le concept de *ville des courtes distances* prend tout son sens. Ce modèle vise à garantir un accès à l'ensemble des besoins du quotidien à une distance praticable à pied autour du domicile, au sein d'un environnement bâti adapté (Logan et al., 2022).

Néanmoins, la notion de développement durable telle qu'introduite dans le Rapport Brundtland (United Nations, 1987) repose évidemment sur des considérations environnementales, mais aussi sociales : il s'agit aussi de protéger les plus démunis. La transition écologique ne doit pas se faire au détriment d'une certaine partie de la population, ce qui suppose, dans le cas des transports, non seulement de décarboner la mobilité, mais aussi de viser un accès équitable aux modes de transport propres.

1.2 Problématique

Maintenant que le contexte actuel de la transition énergétique a été défini, il est nécessaire de clarifier ce qu'implique la transition vers les modes actifs, et en particulier la marche.

Tout d'abord, il faut s'intéresser à la question de l'accessibilité piétonne. Il est intéressant de comprendre que la notion d'accessibilité peut désigner différents concepts, en particulier deux : l'accessibilité universelle et l'accessibilité en termes de proximité et de capacité à rejoindre une destination. D'une part, l'accessibilité universelle est définie par Langevin et al. (2011) comme « le caractère d'un produit, procédé, service, information ou environnement qui, dans un but d'équité et dans une approche inclusive, permet à toute personne de réaliser des activités de façon autonome et d'obtenir des résultats équivalents ». Le but est de garantir un environnement bâti praticable pour tous, même en cas d'incapacité (liée à la vision, à l'agilité ou la mobilité), de limitation (par exemple, marcher sur une longue distance) ou encore de handicap (par exemple, traverser une intersection non équipée de feu sonore) (St-Louis, 2021). D'autre part, l'accessibilité liée à la proximité se rapporte à l'aisance avec laquelle une personne atteint sa destination, en utilisant un certain moyen de transport (El-Geneidy & Levinson, 2011). Le présent travail de

recherche s'intéresse uniquement au second aspect de l'accessibilité, qui traite de la facilité à rejoindre une destination.

Bien que plusieurs articles se soient penchés sur la question de l'accessibilité aux destinations via l'automobile ou le transport en commun (Alam et al., 2010; Kaplan et al., 2014; Kelobonye et al., 2020; Mohri et al., 2021), peu d'entre eux se sont intéressés particulièrement à l'accessibilité piétonne, notamment à Montréal.

En outre, plusieurs méthodes de calcul de l'accessibilité existent, avec plus ou moins de complexité et de précision, selon les données disponibles et l'objectif souhaité (Geurs & van Wee, 2004). L'enjeu est de générer un indicateur d'accessibilité performant, qui puisse en même temps être raisonnablement simple à mettre en place et à interpréter à la fois pour les chercheurs, les politiques et le public. C'est la raison pour laquelle de nombreuses études préfèrent utiliser des mesures relativement peu complexes, qui prennent moins de paramètres en compte, mais qui garantissent une compréhension de tous et une facilité de répliquabilité : en l'occurrence, la méthode dite des *opportunités cumulées* remplit ces attentes (Geurs & van Wee, 2004), et se retrouve de fait très présente dans la littérature (Bertolini et al., 2005; El-Geneidy et al., 2016).

Par ailleurs, dans l'optique de proposer d'éventuels leviers d'action pour les politiques publiques, mesurer le niveau d'accessibilité ne suffit pas. Il faut aussi être capable de caractériser les paramètres qui impactent directement l'accessibilité piétonne. L'enjeu premier est donc d'identifier les potentiels facteurs explicatifs. Pour cela, les principes de la *ville compacte* (ou *ville durable*) d'une part (Burton, 2002; Jabareen, 2006), et la littérature d'autre part (N. Chen & Akar, 2017; Y. Lu et al., 2017; Zhou et al., 2019), permettent de dégager les principaux paramètres décisifs dans la caractérisation de l'accessibilité, notamment en matière d'environnement bâti et de milieu socio-économique. Le second enjeu consiste à mettre en place une méthode appropriée, qui aide à mettre en lumière les facteurs jouant effectivement un rôle dans le niveau d'accessibilité piétonne.

Enfin, comme évoqué précédemment, l'aspect social est au cœur du développement durable (voir 1.1). Il est important de garantir une équité à l'égard de l'accessibilité. Il faut alors identifier les populations vulnérables, et élaborer une méthode pour quantifier le niveau d'équité et s'assurer que les plus démunis bénéficient d'avantages en matière d'accessibilité, de sorte à compenser en partie les inégalités sociales (Guimarães et al., 2020; Tahmasbi et al., 2019).

La problématique principale de ce travail de recherche peut alors s'exprimer ainsi : **dans quelle mesure la forme urbaine et le milieu social sont-ils associés à l'accessibilité piétonne ?** Cette question de recherche en contient en réalité plusieurs : comment générer un indicateur d'accessibilité pertinent ? De quelle manière modéliser la relation entre l'accessibilité et les caractéristiques des milieux urbain et social ? Comment caractériser les populations vulnérables et quantifier le niveau d'équité ?

Pour répondre à ces interrogations, les objectifs du mémoire et la méthodologie du travail de recherche sont présentés dans la suite.

1.3 Objectifs de la recherche

Le présent travail de recherche a pour objectif général de caractériser l'accessibilité piétonne aux destinations sur le territoire de la Ville de Montréal, à travers l'étude des facteurs explicatifs et l'analyse du niveau d'équité sociale. Le projet se base principalement sur des données issues de la Ville de Montréal et du Recensement Canadien de 2021. Plus précisément, quatre objectifs spécifiques sont identifiés :

1. *Construire* les indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations ;
2. *Générer* une typologie de quartiers en fonction du niveau d'accessibilité ;
3. *Déterminer* les variables, en lien avec le concept de la ville des courtes distances, qui expliquent le niveau d'accessibilité piétonne à Montréal ;
4. *Effectuer* une analyse du niveau d'équité sociale de l'accessibilité piétonne, en caractérisant notamment les populations vulnérables.

Ce projet va donc permettre de mieux comprendre la relation entre l'environnement urbain et l'accessibilité piétonne, d'une part à travers l'environnement social, et d'autre part à travers l'environnement bâti, tout en incluant la question de l'équité. Ainsi, il sera possible à l'issue de ce travail de proposer des recommandations quant aux politiques publiques futures, dans un souci de promotion des modes actifs au sein de l'espace urbain.

1.4 Structure du mémoire

La première section de ce mémoire dresse une revue de la littérature, qui permet de comprendre le concept de ville des courtes distances, et d'appréhender les enjeux et les mesures d'accessibilité.

Ensuite, la démarche générale du travail de recherche est présentée, et permet de comprendre le déroulement du projet et la cohérence des différents chapitres.

Le chapitre suivant est entièrement dédié à l'étude de l'accessibilité piétonne à Montréal : l'objectif est de présenter la méthodologie employée pour la génération des indicateurs d'accessibilité, puis de discuter les résultats d'accessibilité aux différentes destinations.

Le CHAPITRE 5 est quant à lui un article scientifique intitulé *Pedestrian Accessibility in Montreal: the Determining Factors and the Level of Social Equity*, et soumis pour présentation et publication à la Conférence internationale du *Transportation Research Board*. Il a été coécrit par l'auteur de ce mémoire (auteur principal), son directeur de recherche Owen Waygood, et sa codirectrice Geneviève Boisjoly. Cet article a été rédigé par l'auteur de ce mémoire, et révisé par Owen Waygood ; Geneviève Boisjoly a participé au travail de recherche ayant permis d'aboutir à la rédaction de l'article, mais n'a malheureusement pas eu la possibilité de le réviser en raison de complications de santé. Ce papier débute par une revue de la littérature sur les différentes mesures d'accessibilité, de façon plus concise que dans le mémoire, et sur la notion d'équité sociale. Ensuite, la méthodologie envisagée pour remplir les objectifs de recherche est détaillée, au sujet de la caractérisation des facteurs qui influencent l'accessibilité piétonne, et de l'évaluation du niveau d'équité de l'accessibilité. Les résultats sont présentés et discutés, puis l'article aboutit à des conclusions.

Une discussion générale est ensuite proposée, afin de revenir sur la méthodologie et les résultats au regard de la revue de la littérature.

Enfin, le dernier chapitre expose les grandes conclusions et contributions de l'étude, ainsi que les limites de la méthodologie employée, et fournit quelques recommandations pour l'amélioration de l'accessibilité piétonne à Montréal. Des axes de réflexion pour la recherche future sont également évoqués.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de la littérature a pour objectif de présenter la ville des courtes distances, et de détailler les principes de fonctionnement de ce type de structure urbaine, avant d'introduire la notion d'accessibilité et les différentes méthodes existantes pour la mesurer. Enfin, une synthèse de la revue littéraire de l'article (voir CHAPITRE 5) concernant l'équité sociale est présentée.

2.1 Le concept de la ville des courtes distances

La présente section vise à introduire le concept général de ville durable, à travers ses différents principes fondateurs, pour évoquer ensuite la notion plus précise de ville des courtes distances.

2.1.1 Le modèle général de la ville durable

Au début des années 1990, les Nations Unies publient un plan d'action en faveur du développement durable, l'Agenda 21, lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro (1993), et impulsent ainsi de nouvelles recherches sur le sujet, notamment dans le but de concevoir des villes plus respectueuses de l'environnement : les *villes compactes* font ainsi leur apparition dans la littérature (Burgess, 2000; Burton, 2002; Kotharkar et al., 2014).

Burton (2002) considère que la ville compacte peut être définie par au moins l'une des trois caractéristiques suivantes : densité élevée, mixité des usages et intensification. Ces trois thématiques incluent également des réflexions sur les transports durables et les espaces verts. Jabareen (2006) appuie cette idée dans sa description de la *ville durable* ; l'auteur y détaille notamment la notion de diversité au sens global, et introduit la conception passive solaire.

2.1.1.1 Compacité

La compacité de l'environnement bâti est un aspect fondamental de la ville durable. Sa définition est délicate dans la mesure où la compacité résulte en quelque sorte de l'ensemble des caractéristiques évoquées précédemment (voir 2.1.1), et apparaît alors comme un but à atteindre. L'idée principale reste néanmoins la compacité de l'environnement bâti, c'est-à-dire la compacité spatiale, afin de limiter l'étalement urbain. En effet, d'après l'article de Bibri et al. (2020), la compacité implique tout d'abord un développement de la ville en partant du centre, au niveau des nœuds stratégiques, tout en réservant les zones extérieures pour un développement futur éventuel.

Il faut également respecter une certaine continuité, une connectivité : les nouveaux espaces urbains doivent être construits à proximité du tissu urbain existant (Bibri et al., 2020).

Construire de façon compacte repose sur une forme d'intensification urbaine, guidée par un développement de la densification ; il s'agit d'aménager les zones peu ou pas développées, de réaménager les zones déjà développées, pour ainsi transformer l'espace urbain (Jenks, 2000).

Finalement, la ville durable doit promouvoir les mixités physique, économique et sociale (la mixité verticale, c'est-à-dire une multiplicité d'usages au sein d'un même bâtiment, ou encore la mixité des logements, des populations, des activités, des commerces, etc.), l'accessibilité à un système de transport en commun sûr et fiable, et doit proposer divers aménagements pour les modes actifs ; il est aussi important de maintenir de nombreux parcs et espaces verts au sein de l'espace urbain (Bibri et al., 2020; Jabareen, 2006).

2.1.1.2 Transport durable

Par définition, le transport durable œuvre pour trois causes : la durabilité environnementale, l'efficacité économique et l'équité sociale (Black et al., 2002). Plus précisément, Jordan et Horan (1997) définissent les services de transport durable comme suit :

Des services de transport qui reflètent l'ensemble des coûts sociaux et environnementaux de leur fourniture, qui respectent la capacité de charge et qui équilibrent les besoins de mobilité et de sécurité avec les besoins d'accès, de qualité de l'environnement et d'habitabilité des quartiers. (Jordan et Horan, 1997, page 72)

Le rôle des politiques publiques est alors de créer les conditions favorables à l'implantation de ces systèmes de transport durables. En effet, lorsque les besoins de mouvement sont réduits grâce à la proximité des activités, il est bien plus facile d'envisager de se déplacer à pied ou à vélo, ou d'emprunter le transport en commun (Jabareen, 2006). Cette thèse est soutenue par Cervero et Kockelman (1997), qui ont montré qu'une densité élevée, une forte mixité d'utilisation des sols et des aménagements urbains favorables à la marche, encouragent les modes alternatifs à la voiture.

2.1.1.3 Densité

Cette notion de densité possède en réalité plusieurs définitions. Ahmadian et al. (2019) identifient notamment deux catégories d'indicateurs pour la densité : la première concerne l'aspect physique et géométrique de l'espace urbain (par exemple, densité de bâti, entropie de la forme urbaine,

densité d'habitations) tandis que la deuxième considère en plus de cela une dimension sociale (par exemple, densité de population, densité d'emplois).

Dovey et Pafka (2014) confirment cette distinction et l'approfondissent. En effet, de nombreux indicateurs de densité fonctionnent par paire, c'est-à-dire en opposition. La première paire concerne celle déjà introduite, à savoir densités physique et géométrique. La seconde implique les densités nette et brute : la densité nette est calculée à l'intérieur d'un site (sans considérer l'environnement extérieur), tandis que la densité brute considère l'espace public ; par exemple, la densité nette de population serait basée sur l'espace résidentiel seulement, alors que la densité brute de population serait calculée sur l'espace bâti (Kim & Kim, 2013). La troisième paire oppose la densité externe (à l'échelle d'un quartier) et la densité interne (calculée en nombre de personnes par pièce ou par surface de plancher). Enfin, les mesures citées précédemment appartiennent à la famille des densités mesurées, par opposition aux densités perçues, qui s'intéressent davantage à l'aspect psychologique de la densité et de la foule.

En résumé, les indicateurs communément utilisés pour caractériser la densité dans un espace urbain sont le ratio entre la surface de plancher et la surface totale d'un site, la densité de logements, la densité de population, la densité résidentielle, la densité d'emplois, la densité nette, la densité brute, la densité physique, la densité mesurée, la densité perçue, la densité interne, la densité spatiale, et la densité sociale (Dovey & Pafka, 2014).

Enfin, il s'agit de comprendre le rôle de pilier que joue la densité de population (ou de logements) dans la construction de la ville durable. En effet, Jabareen (2006) et Burton (2002) expliquent qu'une densité faible va de pair avec une difficulté à atteindre les lieux d'intérêt sans utiliser la voiture, tandis qu'une densité élevée contribue à la diminution de la possession automobile et de son usage, et à une augmentation de l'utilisation des transports collectifs et des modes actifs (Transportation Research Board of the National Academy, 1996) ; il est à noter que la littérature utilise souvent les termes de densité faible ou de densité élevée, sans pour autant fixer de seuil, dans la mesure où cela dépend du contexte relatif à l'étude. À cela s'ajoute le fait que la vitalité d'un quartier nécessite une forte densité, qui permettra de favoriser les interactions sociales (Jabareen, 2006).

2.1.1.4 Mixité des usages du sol

Dans leur article, Bibri et al. (2020) apportent une définition de la mixité d'utilisation des sols :

[...] la mixité d'utilisation des sols désigne la diversité et la proximité d'utilisations compatibles des sols, une forme d'infrastructures résidentielles, commerciales, institutionnelles et culturelles transversales associées à la vie, au travail et à la fourniture de services et d'équipements. (Bibri et al., 2020, page 10)

En supposant une densité élevée, promouvoir la mixité des usages du sol contribue à réduire l'utilisation de l'automobile au profit des modes actifs (Cervero & Radisch, 1996; Seong et al., 2021). Cela participe également à limiter la pollution, bien qu'il semble y avoir un niveau optimal de mixité au-delà duquel la réduction des émissions de CO₂ ne s'observe plus (Q. Li et al., 2022).

La littérature distingue principalement deux types de mixité d'utilisation des sols : la mixité verticale et la mixité horizontale. En effet, ces deux notions sont complémentaires : la mixité verticale désigne la diversité d'usages sur une parcelle ou sur un bâtiment (Cervero & Kockelman, 1997; Ghosh & Raval, 2021), tandis que la mixité horizontale s'observe au niveau du sol, en considérant plusieurs bâtiments d'une rue par exemple (Zhong & Hui, 2021).

2.1.1.4.1 Mesures traditionnelles de la mixité des usages du sol

Parmi les mesures utilisées pour caractériser la mixité, dont la mixité d'utilisation des sols, l'entropie (B. B. Brown et al., 2009; Cervero & Kockelman, 1997; Frank & Pivo, 1994; Mavoa et al., 2018) et l'indice de Herfindahl-Hirschman (Clifton et al., 2009; Ghosh & Raval, 2021; Rabiei-Dastjerdi et al., 2018; Wo, 2019) sont largement présents dans la littérature.

Il existe plusieurs écritures de l'entropie, dont voici une formulation générale (Song et al., 2013) :

$$E = - \frac{\sum_{j=1}^k P_j \ln(P_j)}{\ln(k)} \quad (2.1)$$

où E est l'indice d'entropie, k est le nombre d'usages différents du sol représentés dans la zone ($k \geq 2$), et P_j est la proportion de terre du type j dans la zone. L'équation (2.1) impose que l'entropie soit comprise entre 0 et 1 : la mixité est d'autant plus forte que l'indice est proche de 1.

Dans l'ouvrage de Hirschman (1964), l'indice de Herfindahl-Hirschman s'écrit :

$$HHI = 1 - \sum_{i=1}^k s_i^2 \quad (2.2)$$

où HHI est l'indice de Herfindahl-Hirschman, k est le nombre d'usages différents et s_i désigne la proportion de terre du type i dans la zone. Selon l'équation (2.2), cet indice varie entre 0 (s'il n'y a qu'un seul type d'usage, donc une mixité nulle) et $1 - 1/k$ pour une mixité maximale.

Ces deux indicateurs présentent l'avantage d'une équation simple, et sont donc faciles à manipuler et à implémenter. Cependant, Jiao et al. (2021) ont montré que l'entropie a tendance à caractériser davantage l'uniformité de la mixité des usages plutôt que la diversité elle-même, à l'inverse de l'indice de Herfindahl-Hirschman que les auteurs présentent comme davantage sensible à la diversité des usages.

L'article de Song et al. (2013), qui réalise un inventaire des différentes mesures de diversité d'utilisation des sols présentes dans la littérature, montre que les indices d'entropie et de Herfindahl-Hirschman fournissent des conclusions identiques quant à l'évaluation de la mixité d'utilisation des sols. Les auteurs font également mention d'autres indicateurs : les pourcentages et les proportions (un pourcentage est un rapport de deux quantités du même type, tandis qu'une proportion peut être un ratio de deux types de quantités différents), l'indice de balance ou d'équilibre (*balance index*), l'indice d'Atkinson, l'indice de regroupement (*clustering index*), l'indice de dissemblance (*dissimilarity index*), l'indice d'exposition ou encore l'indice de Gini. Les constats faits dans cette étude confirment la pertinence des indices d'entropie et de Herfindahl-Hirschman en tant qu'indicateurs de la mixité d'utilisation des sols. En particulier, dans le cas où plus de trois catégories d'usages du sol sont prises en compte, les auteurs privilégient les mesures multidimensionnelles (dans le sens où plus de deux dimensions, c'est-à-dire plus de deux types d'utilisations du sol, sont considérées) telles que l'entropie, l'indice de Herfindahl-Hirschman ou encore l'indice de dissemblance (Song et al., 2013). Introduit par Duncan et Duncan (1955) dans une étude visant à évaluer la ségrégation résidentielle, l'indice de dissemblance mesure le degré de similarité entre la distribution des usages dans les différents quartiers d'un territoire, et la distribution de ces usages sur le territoire entier.

Cependant, des limites évidentes apparaissent avec ces deux indicateurs : l'entropie ne prend ni en compte l'importance relative des divers types d'usage, ni leurs interactions, ni leur configuration (Hajna et al., 2014) ; ces biais sont également présents avec l'indice de Herfindahl-Hirschman, dans la mesure où, comme pour l'entropie, la proportion d'une certaine utilisation du sol est l'unique facteur considéré dans le calcul.

2.1.1.4.2 Méthode d'interaction

Pour remédier aux lacunes des mesures de mixité traditionnelles évoquées précédemment (voir 2.1.1.4.1), une nouvelle méthode a été développée par Manaugh et Kreider (2013), sous le nom de *méthode d'interaction*.

À la différence des mesures d'entropie et de Herfindahl-Hirschman, la méthode d'interaction incorpore dans son calcul une dimension supplémentaire : l'interaction entre les différentes utilisations du sol, c'est-à-dire la manière dont les utilisations sont organisées sur le territoire et non plus seulement les proportions de chaque usage.

Pour mettre en place cette méthode, il suffit de considérer sur un territoire donné les polygones relatifs aux différents usages ; ensuite, ces polygones sont transformés en lignes, et seules les lignes qui séparent deux usages distincts sont conservées ; finalement, la somme des longueurs de ces lignes est calculée à l'échelle souhaitée (par exemple au niveau de chaque secteur de recensement), puis divisée par la surface de la zone (ici le secteur de recensement). Les valeurs obtenues peuvent ensuite être normalisées. Par conséquent, une zone bénéficiant d'usages distincts proches les uns des autres aura une meilleure mixité qu'une zone profitant des mêmes usages, dans les mêmes proportions, mais davantage séparés dans l'espace.

2.1.1.5 Diversité

Après avoir introduit la notion de mixité d'utilisation des sols, il est intéressant réfléchir à la notion de diversité dans une démarche plus globale. Comme l'écrit Jabareen (2006) : « la diversité représente le contexte social et culturel de la forme urbaine » (Jabareen, 2006, page 42).

L'idée que la diversité est un vecteur de durabilité de l'espace urbain est apparue avec Jane Jacobs, qui écrit dans son ouvrage *The Death and Life of Great American Cities* (1961b) que plus un espace est diversifié, plus la marche est attractive ; cette diversité rend l'espace urbain vivant et agréable. Dans le chapitre intitulé « Some myths about diversity » (Jacobs, 1961a), l'auteur démontre que la diversité est esthétique, que celle-ci contribue à réduire la congestion routière, et qu'aucune corrélation n'existe entre diversité et nuisance. Tout d'abord, alors que l'homogénéité semble supposer une certaine ordonnance, celle-ci crée paradoxalement une situation de chaos, dans laquelle aucune direction n'est réellement discernable. Cet environnement monotone aboutit à des différenciations superficielles entre les bâtiments, afin de les reconnaître, ce qui n'apporte aucune

harmonie à l'espace urbain ; au contraire, Jacobs (1961a) soutient que la diversité des fonctions et des âges des bâtiments, des types de constructions, aussi bien que la variété architecturale profonde des édifices, permettent de créer des contrastes naturels qui s'assemblent pour former un tout esthétique. Ensuite, un espace urbain peu dense et peu diversifié favorisera inévitablement l'utilisation de la voiture ; à l'inverse, une zone offrant des services variés et proches les uns des autres, sera parcourue à pied. Enfin, Jacobs (1961a) soutient que la diversité n'implique pas une dangerosité ou une quelconque nuisance, mais explique que les parkings, les dépôts de poids lourds, les stations-service, la publicité extérieure et les entreprises dont la taille disproportionnée perturbe l'équilibre du tissu urbain, doivent être justement maîtrisés pour ne pas entraver la diversité ; concernant ces services, l'échelle est la source du problème, non l'usage.

Enfin, parmi les indicateurs de diversité les plus utilisés pour caractériser l'accessibilité et les comportements de transport, la littérature mentionne notamment la diversité du niveau de revenu (c'est-à-dire le degré avec lequel les niveaux de revenu sont mélangés au sein de la population d'une zone donnée), du niveau d'éducation, de l'âge des personnes, du type de famille, de la taille des ménages, de l'origine ethnique ou encore de la situation professionnelle, ainsi que la diversité du bâti, de l'âge du bâti, de l'utilisation du sol ou encore de la densité d'intersections (Cervero & Radisch, 1996; N. Chen & Akar, 2017; Cho & Kim, 2017; Hong et al., 2014; Y. Lu et al., 2017; Zhou et al., 2019).

2.1.1.6 Intensification

Un autre principe de la ville compacte énoncé par Burton (2002) concerne l'intensification, qui se décompose en trois axes : l'augmentation de la population, l'augmentation du développement urbain et l'augmentation de la mixité des usages au sein de la ville. L'augmentation de la population se traduit par une hausse de la densité de population. En ce qui concerne l'intensification du développement urbain, il s'agit en réalité de réutiliser des terrains urbains parfois vacants, de les réaménager en construisant des extensions, tout en promouvant une densité plus élevée ; cette intensification doit se concentrer au niveau des nœuds stratégiques (comportant des installations de transport public notamment) et des centres secondaires. Enfin, la ville compacte doit soutenir la mixité des usages, à la fois verticale et horizontale (voir section 2.1.1.4) (Burton, 2002).

2.1.1.7 Urbanisme vert

Dans le contexte actuel qui voit les villes se développer sans cesse, la place de la nature au sein des espaces urbains est un sujet qui prend tout son sens. Le développement durable se veut écoresponsable et prône une certaine reconnexion avec la nature, et les villes ne font pas exception. Néanmoins, promouvoir les espaces verts en ville ne présente pas le seul avantage de reconnecter les citoyens avec la nature. Comme l'explique Jabareen (2006), les espaces verts en zone urbaine apportent de multiples bienfaits, qui se résument en quatre points : le maintien de la biodiversité, l'amélioration des conditions de vie et de la santé (par exemple, la réduction de la pollution, la désimperméabilisation des sols pour un drainage naturel), l'amélioration de l'image de l'espace urbain en participant au développement durable, et enfin le renforcement de l'attractivité de l'espace urbain et la fierté de la communauté.

Par ailleurs, Navarrete-Hernandez et Laffan (2019) montrent que toute intervention visant à encourager la verdure au sein de l'espace urbain augmente effectivement le niveau de bonheur perçu, tout en diminuant le niveau de stress. Les espaces publics, tels que les espaces verts et les parcs, favorisent également l'activité physique, et notamment la marche (Koohsari et al., 2015).

2.1.1.8 Conception solaire passive

L'idée générale de la conception solaire passive décrite par Jabareen (2006) est de réduire la demande en énergie et de promouvoir l'utilisation durable de l'énergie passive. Cet enjeu repose sur la nature de l'environnement urbain, et nécessite une amélioration du bâti afin d'optimiser l'usage de l'énergie solaire et des conditions climatiques, et ainsi limiter le besoin de sources d'énergie additionnelles pour le chauffage ou la climatisation. Cet aspect de la ville durable, bien que très pertinent, n'est cependant pas pris en compte dans ce projet.

2.1.2 La ville des courtes distances

La *ville des courtes distances*, communément appelée *ville des x-minutes* (x valant généralement 10, 15 ou 20), est une conception de la ville qui découle des notions de *ville compacte* et de *ville durable* (voir 2.1.1), selon laquelle toute la population doit avoir accès aux services quotidiens en moins de x minutes depuis le domicile, grâce à un espace urbain qui favorise les modes actifs tels que la marche et le vélo (Logan et al., 2022).

Logan et al. (2022) évoquent notamment trois bienfaits apportés par la *ville des courtes distances* : l'amélioration de la santé publique, une plus grande justice environnementale et un renforcement de la cohésion sociale. En effet, ce modèle de ville contribue en premier lieu à réduire les émissions polluantes en favorisant l'usage de modes doux tels que la marche ou le vélo : l'amélioration de la qualité de l'air d'une part participe à un environnement urbain plus sain, et la pratique d'une activité physique d'autre part améliore la santé des résidents (Vuori, 1998). La *ville des courtes distances* permet également de combattre l'injustice environnementale : dans le cas où l'usage de la voiture reste globalement important au sein de la ville, les habitants qui ne possèdent pas de véhicule sont perturbés par le passage des automobilistes, et pâtissent alors de plusieurs externalités négatives telles que la pollution de l'air, les nuisances sonores ou encore le danger lié au trafic (Nieuwenhuijsen et al., 2019). Enfin, les quartiers piétons sont propices aux interactions sociales, dans la mesure où les habitants ont tendance à mieux connaître leurs voisins, à davantage faire confiance aux autres et donc à s'engager plus sereinement dans la vie sociale et politique de leur ville (Leyden, 2003).

2.2 Mobilité et accessibilité : deux notions distinctes

Mobilité et accessibilité sont deux concepts bien différents, qui doivent être définis précisément. Dans la littérature, la mobilité est généralement définie comme la facilité avec laquelle un individu se déplace, tandis que l'accessibilité représente plutôt la facilité avec laquelle une destination est atteinte (Dalvi & Martin, 1976; El-Geneidy & Levinson, 2011; Koenig, 1980; Preston & Rajé, 2007; Sager, 2006).

Dans leur article, El-Geneidy et Levinson (2011) résument parfaitement cette distinction :

La mobilité mesure la capacité à se déplacer d'un endroit à un autre. Le mot accessibilité est dérivé des mots « accès » et « habilité », signifiant ainsi la capacité d'accéder, où « accès » est l'action d'approcher quelque chose. Le mot dérive du latin *accedere* « venir » ou « arriver ». Nous nous intéressons ici à la facilité d'atteindre des destinations ou des activités appréciées plutôt qu'à la facilité de voyager le long du réseau lui-même. (El-Geneidy et Levinson, 2011, page 644)

En effet, certains modes de transport sur un trajet donné offrent une très bonne mobilité, mais une accessibilité médiocre. À titre d'exemple, la voiture offre une très bonne mobilité, en nous permettant de faire de longs trajets, de manière confortable, avec la liberté d'emprunter le chemin que l'on souhaite : il est aisé de se déplacer en voiture. Néanmoins, si nous souhaitons nous déplacer en voiture dans une ville, alors il est probable que nous rencontrions des difficultés à

stationner par exemple : dans ce cas, nous peinons à atteindre notre destination, donc l'accessibilité n'est pas bonne.

2.3 Mesurer l'accessibilité

L'accessibilité, qui nous intéresse donc davantage dans ce mémoire, n'est pas une notion absolue, qui se définirait à l'aide d'un calcul universel. Au contraire, il existe une multitude de méthodes qui permettent d'aboutir à un indicateur d'accessibilité, selon l'objectif de l'étude, les données mises à disposition ou encore le niveau de précision souhaité.

Plus exactement, Geurs et van Wee (2004) expliquent que l'accessibilité se divise en quatre composantes : l'utilisation du sol, le transport, la temporalité et l'individu. Ces derniers énumèrent ensuite quatre approches qui permettent de caractériser et de mesurer l'accessibilité : les mesures basées sur l'infrastructure, sur la localisation, sur l'individu et sur l'utilité.

Il est à noter que l'article (voir CHAPITRE 5) dresse également une revue de la littérature des mesures d'accessibilité, néanmoins plus succincte.

2.3.1 Mesures basées sur l'infrastructure

Mesurer l'accessibilité à travers l'infrastructure revient à mesurer le niveau de performance des infrastructures de transport, en évaluant notamment la congestion, la vitesse sur le réseau ou encore les temps de trajet. L'avantage de cette mesure réside en sa facilité de calcul (les données sont généralement aisément accessibles) et d'interprétation, d'où son utilisation en planification du transport (Geurs & van Wee, 2004). Lu et al. (2021) proposent notamment de calculer l'accessibilité au réseau routier en fonction des caractéristiques de l'infrastructure routière, dans le but d'analyser la vulnérabilité du réseau.

En revanche, Geurs et van Wee (2004) expliquent que ce type de mesure ignore la dimension liée à l'aménagement du territoire, c'est-à-dire l'impact d'une modification d'une infrastructure de transport sur l'utilisation du sol, et ne permet pas de mesurer l'influence des aménagements du territoire sur l'accessibilité.

2.3.2 Mesures basées sur la localisation

La deuxième famille présentée par Geurs et van Wee (2004) concerne les mesures basées sur la localisation. L'accessibilité y est ici calculée à un niveau macroscopique, en fonction de la

distribution spatiale des activités. De façon générale, l'accessibilité est calculée selon l'équation (2.3), qui s'écrit (Vale et al., 2015) :

$$A_i = \sum_j O_j f(C_{ij}) \quad (2.3)$$

où A_i est l'accessibilité de la zone i , O_j est le nombre d'opportunités disponibles dans la zone j , C_{ij} est le coût du trajet entre les zones i et j , et f est une fonction d'impédance qui mesure la séparation spatiale entre les zones i et j .

2.3.2.1 Mesures de distance et d'opportunités

La première catégorie concerne les mesures de distance et les mesures d'opportunités. Tout d'abord, les mesures basées sur la distance (ou la connectivité) représentent le concept le plus simple pour déterminer le degré avec lequel deux points sont connectés, par exemple en calculant la distance à vol d'oiseau entre ces deux points (Geurs & van Wee, 2004). Ensuite, dans le cas où plus de deux destinations potentielles sont étudiées, des mesures dites de contour sont employées ; ces mesures sont également appelées mesures isochrones, d'opportunités cumulées, de comptage de proximité ou d'accessibilité quotidienne. Le terme d'isochrone se rapporte au fait que l'accessibilité est calculée selon une courbe isochrone, qui désigne une courbe qui délimite la surface atteignable à pied depuis un point choisi, pour une durée (ou une distance) fixée. Deux logiques sont possibles avec ce type de mesure : compter le nombre d'opportunités disponibles selon un coût fixe (distance ou temps), ou déterminer le coût nécessaire pour atteindre une quantité fixée d'opportunités (Geurs & van Wee, 2004).

Dans le cas d'une mesure d'opportunités cumulées (ou isochrone) la fonction d'impédance f prend la forme d'une fonction indicatrice, telle que (Vale et al., 2015) :

$$f(C_{ij}) = \begin{cases} 1, & C_{ij} \leq x \\ 0, & C_{ij} > x \end{cases} \quad (2.4)$$

où C_{ij} est le coût du trajet entre les zones i et j (distance ou temps) et x représente un seuil au-delà duquel l'accessibilité est considérée nulle. Cette méthode des opportunités cumulées est très présente dans la littérature (Bertolini et al., 2005; El-Geneidy et al., 2016; Kelobonye et al., 2020), en raison de sa facilité de mise en place, en ce qui concerne à la fois les données requises et le calcul, et de sa facilité d'interprétation (Geurs & van Wee, 2004).

2.3.2.2 Mesures gravitaires

La seconde catégorie désigne les mesures de potentiel (ou mesures gravitaires), introduites par Hansen (1959), qui consistent à calculer l'accessibilité d'une zone i aux opportunités des autres zones j , tout en considérant une influence d'autant plus faible que l'opportunité est de faible importance ou éloignée (Geurs & van Wee, 2004).

Dans ce cas, la fonction d'impédance f définie dans l'équation (2.3) est l'élément qui permet de modéliser l'éloignement des opportunités, et de l'interpréter comme une diminution de l'accessibilité : f prend le plus souvent la forme d'une exponentielle décroissante ou d'une fonction puissance (Alam et al., 2010; Apparicio et al., 2008; Geurs & van Wee, 2004; Hansen, 1959; M. Li et al., 2018; Sun et al., 2012) telle que :

$$f(C_{ij}) = e^{-\beta C_{ij}} \quad (2.5)$$

ou

$$f(C_{ij}) = C_{ij}^{-\alpha} \quad (2.6)$$

où c_{ij} est le coût du trajet entre i et j (qui peut être une distance ou un temps), et α et β sont des paramètres de sensibilité au coût (à déterminer).

2.3.3 Mesures basées sur l'individu

Comme l'explique Hägerstrand (1970), mesurer l'accessibilité à partir de l'individu revient à évaluer les contraintes spatio-temporelles qui lui sont imposées, telles que le lieu et la durée des activités obligatoires, le budget-temps des activités flexibles et la vitesse de déplacement permise par le système de transport (Geurs & van Wee, 2004). Ainsi, ce genre de mesure est notamment utile pour évaluer les impacts sociaux d'une modification de l'environnement, au niveau des usages du sol ou des transports (Geurs & van Wee, 2004). Dans leur article, Yoon et Goulias (2010) évaluent par exemple la relation entre l'accessibilité et l'usage du temps, dans le cadre des interactions au sein d'un ménage.

En effet, l'usage important de mesures basées sur la localisation est critiqué pour le caractère agrégé du résultat : calculer l'accessibilité en se basant seulement sur des considérations spatiales ne permet pas de capter les comportements hétérogènes des individus (Kwan & Weber, 2003). En

revanche, les mesures basées sur l'individu sont difficiles à opérationnaliser et à communiquer (Geurs & van Wee, 2004).

2.3.4 Mesures basées sur l'utilité

Enfin, les mesures d'accessibilité basées sur l'utilité modélisent l'accessibilité comme le résultat d'un choix de transport, et visent donc à évaluer les bénéfices que retirent les individus de l'accès aux opportunités, notamment d'un point de vue économique (Geurs & van Wee, 2004).

Dans leur étude, Chen et al. (2007) utilisent notamment une mesure d'accessibilité basée sur l'utilité (dans le cadre de la théorie de l'utilité aléatoire) afin d'évaluer les conséquences d'une perturbation du système de transport, en vue d'analyser la vulnérabilité du réseau.

Néanmoins, l'interprétation de ce type de mesure requiert un bagage théorique important, ce qui complique sa communication (Geurs & van Wee, 2004).

2.3.5 Types de distances

La distance, utilisée dans le cadre de mesures de l'accessibilité, peut aussi être mesurée de différentes façons : la distance euclidienne, la distance de Manhattan et la distance la plus courte sur le réseau (Apparicio et al., 2008).

La distance euclidienne, en tant que distance en ligne droite, est la plus simple à calculer. Néanmoins, celle-ci ne reflète pas la distance réelle qu'un individu doit parcourir au sein de l'espace urbain, dans lequel il est impossible de se déplacer en ligne droite.

La distance de Manhattan est une tentative pour pallier cet inconvénient : cette méthode considère que les rues sont organisées de façon orthogonale, donc que la distance peut être calculée comme l'hypoténuse d'un triangle rectangle.

Enfin, la distance calculée sur le réseau constitue la mesure la plus réaliste, car elle est liée à l'expérience réelle sur le terrain des droits de passage publics (réseau routier).

2.4 L'équité sociale

La présente partie expose les principes de l'équité, qui seront également évoqués dans la revue de littérature propre à l'article (voir CHAPITRE 5). Cette section propose une revue néanmoins plus détaillée que celle présentée dans l'article, et permet au lecteur d'avoir en tête le concept de l'équité lors de la lecture du CHAPITRE 4.

2.4.1 Définitions générales

L'équité se décompose en deux notions : l'équité horizontale et l'équité verticale (Delbosc & Currie, 2011; El-Geneidy et al., 2016).

Dans leur article, Delbosc et Currie (2011) définissent l'équité horizontale comme suit :

L'équité horizontale (justice ou égalitarisme) consiste à fournir des ressources égales à des individus ou à des groupes considérés comme ayant les mêmes capacités. Elle évite de favoriser un individu ou un groupe par rapport à un autre et les services sont fournis de manière égale, quels que soient les besoins ou les capacités (Delbosc & Currie, 2011, page 1252).

L'équité verticale quant à elle est présentée de la manière suivante :

L'équité verticale (justice sociale, justice environnementale ou inclusion sociale) concerne la répartition des ressources entre des individus ayant des capacités et des besoins différents. L'équité verticale favorise les groupes basés sur la classe sociale ou les besoins spécifiques afin de compenser les inégalités sociétales globales (Delbosc & Currie, 2011, page 1252).

En d'autres termes, l'équité horizontale vise l'égalité de traitement de tous les individus, tandis que l'équité verticale apporte une dimension de justice sociale, en vertu de laquelle les plus vulnérables, de par leur situation socio-économique ou physique (Mohri et al., 2021), devraient recevoir davantage de soutien de la part de la société.

2.4.2 Mesurer l'équité horizontale

La caractérisation de l'équité horizontale permet d'évaluer dans quelle mesure un bien ou un service est équitablement réparti au sein d'une population globale, sans différenciation entre les individus. Dans le cadre d'une analyse d'accessibilité, cet indicateur permet de détecter d'éventuels déséquilibres dans la distribution spatiale de ce bien ou service (Camporeale et al., 2017). Une mesure très largement utilisée dans la littérature consiste à calculer l'indice de Gini (Azmoodeh et al., 2021; Cascetta et al., 2020; Kaplan et al., 2014; Welch, 2013; Welch & Mishra, 2013).

Ce coefficient de Gini est dérivé des courbes de Lorenz (1905), utilisées à l'origine en économie pour évaluer la répartition des richesses au sein de la population. La Figure 2.1 est une représentation graphique arbitraire d'une courbe de Lorenz et de l'indice de Gini associé, dans le contexte de la distribution des revenus au sein d'une population. L'axe des abscisses représente la proportion cumulée de la population, tandis que l'axe des ordonnées représente la proportion cumulée du revenu. La droite d'égalité parfaite est représentée par une ligne en pointillé : sur cette

ligne, tous les agents reçoivent la même quantité du bien ou du service en question ; par exemple, toutes les personnes reçoivent exactement le même revenu. En revanche, la courbe de Lorenz illustre une situation inégalitaire dans laquelle toutes les personnes ne reçoivent pas le même revenu : plus l'aire sous la courbe de Lorenz est faible, plus la situation est inégalitaire. En effet, plus la courbe de Lorenz est convexe, plus la proportion de la population qui se partage une part immense de la richesse est faible.

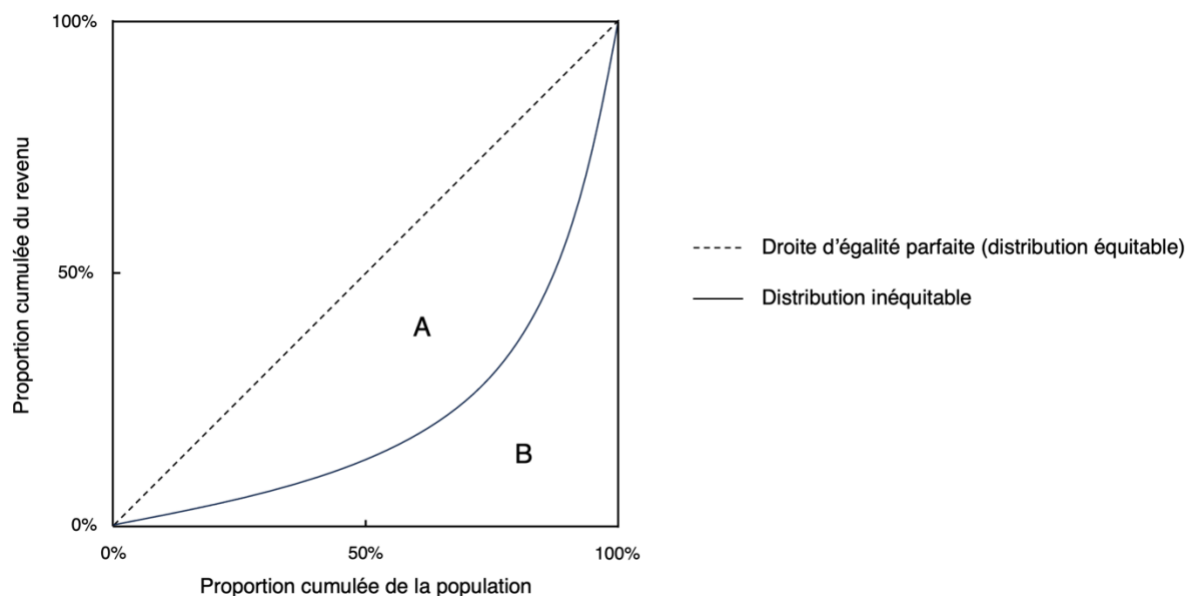


Figure 2.1 Exemple de représentation graphique d'une courbe de Lorenz pour la distribution du revenu au sein d'une population (source : Julien Verdier)

Ainsi, le coefficient de Gini est calculé graphiquement comme le rapport de deux surfaces (Delbosc & Currie, 2011) tel que :

$$G = \frac{A}{A + B} \quad (2.7)$$

où G est le coefficient d'équité de Gini, A est l'aire comprise entre la droite d'égalité parfaite et la courbe de Lorenz, et B est l'aire sous la courbe de Lorenz (voir Figure 2.1). Dans le cas où G est égal à 1, l'intégralité du bien ou service appartient à une seule personne, dont résulte une inégalité totale ; dans le cas où G est égal à 0, chaque individu reçoit la même quantité du bien ou du service en question, ce qui représente une situation d'égalité parfaite.

Il existe également une formule mathématique qui permet de calculer le coefficient de Gini, qui peut être approximée par l'expression suivante (M. C. Brown, 1994) :

$$G = 1 - \sum_{k=0}^{n-1} (Y_{k+1} + Y_k)(X_{k+1} - X_k) \quad (2.8)$$

où G est le coefficient de Gini, n est le nombre de tranches de la population, X_k est la proportion cumulée de la population et Y_k est la proportion cumulée du bien ou du service (pour $k \in \llbracket 0, n-1 \rrbracket$, avec $X_0 = Y_0 = 0$ et $X_n = Y_n = 1$).

2.4.3 Mesurer l'équité verticale

Le principe de l'équité verticale est le suivant : garantir aux populations les plus vulnérables un meilleur accès à un bien ou un service quelconque.

Dans le cadre de l'accessibilité, une première méthode consiste à calculer l'accessibilité moyenne au sein des différentes classes sociales de la population, afin de détecter les disparités. C'est ce que proposent Tahmasbi et al. (2019), en créant trois catégories de ménages basées sur le revenu, et en calculant l'accessibilité moyenne pour chacune d'entre elles ; une situation équitable accorderait une meilleure accessibilité aux ménages ayant les revenus les plus faibles. Les auteurs présentent également une seconde méthode : l'équité horizontale (coefficient de Gini) est calculée pour chaque catégorie de revenus, permettant d'évaluer si la distribution de l'accessibilité est équitable ou non au sein de la population la plus vulnérable ; cette analyse est complémentaire à la première, dans la mesure où cette dernière apporte des informations supplémentaires sur la distribution de l'accessibilité au sein des groupes.

La segmentation de la population repose généralement sur des caractéristiques socio-économiques telles que le revenu (Guimarães et al., 2020; Tahmasbi et al., 2019), l'âge (Ricciardi et al., 2015) ou encore la possession automobile (Delbosc & Currie, 2011). Des considérations sur la démographie, le logement, l'hygiène et la santé permettent également d'isoler les plus vulnérables (Sharma & Patil, 2021). À partir de ces catégories de population, il est alors possible de comparer le niveau d'accessibilité des plus désavantagés avec celui des autres, et d'évaluer le niveau d'équité au sein-même d'une population jugée vulnérable. Étant donné qu'une plus grande accessibilité peut être liée à des coûts de logement plus élevés (Luo et al., 2021), nous nous concentrerons dans cette étude sur le revenu des ménages.

CHAPITRE 3 DÉMARCHE DU TRAVAIL DE RECHERCHE

Le présent travail de recherche s'inscrit dans un projet financé par la Ville et Montréal et par Mitacs, dont l'un des objectifs est de développer des méthodologies pour mesurer l'accessibilité aux destinations via les modes actifs, et en particulier la marche, en se référant aux principes de la *ville des courtes distances*.

La revue de la littérature a donc permis de dégager les principes de la ville des courtes distances et ainsi de déterminer les facteurs potentiels à prendre en compte lors de la caractérisation de l'accessibilité, de faire l'inventaire des différentes mesures d'accessibilité connues, avant d'évoquer la notion d'équité et les indicateurs permettant de la mesurer. Cette revue de la littérature a mis en lumière l'importance de s'intéresser à ce modèle de ville pour ses avantages, ainsi que le manque d'études faites sur le cas de Montréal en ce qui concerne les facteurs de l'accessibilité piétonne. En effet, la littérature ne fournit pas de cadre méthodologique pour caractériser les facteurs de l'accessibilité piétonne aux destinations à Montréal, en lien avec la ville des courtes distances.

Par conséquent, ce projet vise d'une part à répondre aux attentes de la Ville de Montréal, et d'autres part à combler certaines lacunes de la littérature, avec pour objectif de proposer une méthodologie pour caractériser les facteurs déterminants de l'accessibilité piétonne à Montréal, dans une perspective d'équité sociale, tout en se basant sur les principes de la ville des courtes distances.

À la suite de la revue de littérature, les objectifs spécifiques ont été déterminés, et ont permis d'aboutir à une méthodologie générale présentée en Figure 3.1. Cette figure détaille les données utilisées pour satisfaire chaque objectif spécifique, identifie les résultats obtenus grâce à ces données et renseigne sur la nature de ces résultats.

En effet, la première étape consiste en la collecte et le traitement de données. Pour ce faire, deux sources sont principalement utilisées : les données géolocalisées relatives aux destinations (DMTI, 2020; Données Québec, 2022a, 2022b; Marchés publics de Montréal, 2022; Ville de Montréal, 2022a, 2017, 2021a, 2022b, 2022c, 2022d), les données géolocalisées pour l'étude de l'environnement bâti (Statistique Canada, 2021b; Ville de Montréal, 2023b, 2023c), et les données du Recensement Canadien (2021).

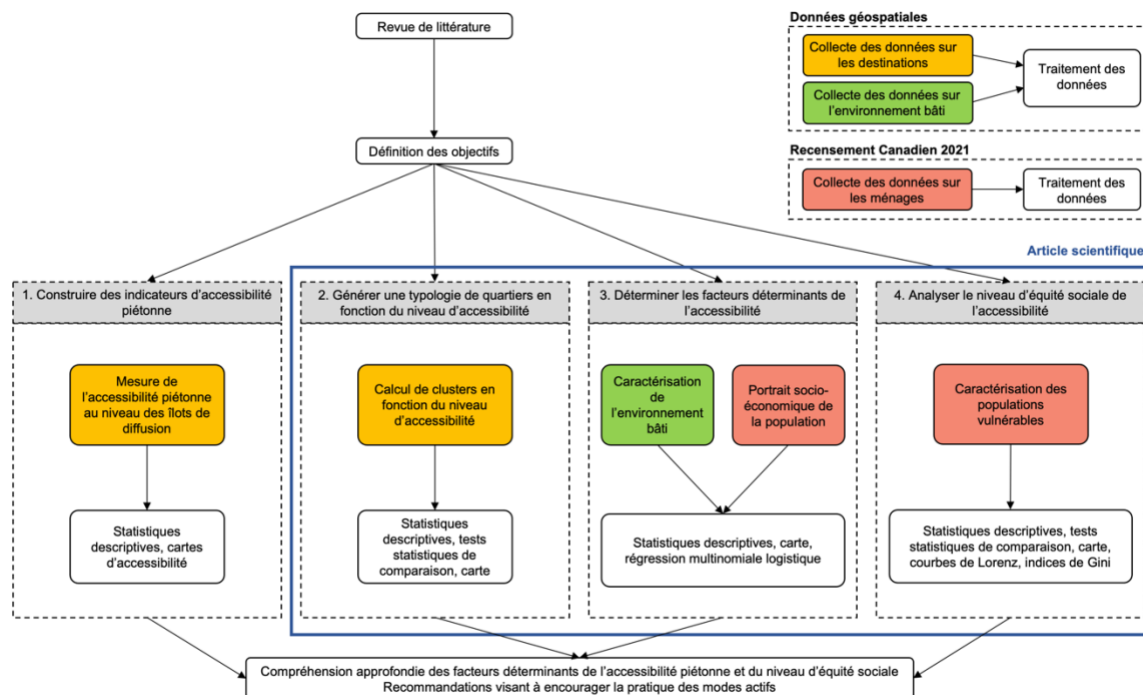


Figure 3.1 Méthodologie générale du travail de recherche

Le **premier objectif** vise à générer les indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations au niveau des îlots de diffusion. Pour y parvenir, la méthode des opportunités cumulées est envisagée, et permet d'aboutir à des statistiques descriptives et des cartes d'accessibilité (voir CHAPITRE 4).

Les trois objectifs suivants sont abordés dans l'article scientifique intitulé *Pedestrian Accessibility in Montreal: the Determining Factors and the Level of Social Equity* et présenté au CHAPITRE 5. Le **second objectif**, à partir des scores d'accessibilité disponibles au niveau de chaque îlot de diffusion, consiste à générer une typologie de quartiers en fonction du niveau d'accessibilité. Pour cela, une méthode de regroupement est utilisée (k-moyennes), et aboutit à quatre classes qui décrivent quatre types de quartiers à Montréal. Des tests de comparaison statistiques (ANOVA de Welch) sont également menés afin d'analyser les différences entre classes.

Le **troisième objectif** spécifique repose sur des données ouvertes relatives à l'environnement bâti et sur les données socio-économiques du Recensement Canadien de 2021. En effet, afin d'expliquer les facteurs déterminants de l'accessibilité, différents modèles de régression multinomiale logistique sont développés, en prenant comme variable dépendante le type de cluster (déterminé dans le second objectif), et comme variables indépendantes à la fois les environnements social et

bâti. Ces modèles permettent de dresser des conclusions quant aux facteurs les plus influents sur le niveau d'accessibilité piétonne.

Enfin, le **quatrième objectif** analyse le niveau d'équité de la distribution de l'accessibilité sur le territoire, et au sein de la population. Cet objectif permet à la fois d'évaluer l'équité de la distribution spatiale de l'accessibilité (équité horizontale), et également d'évaluer l'impact du milieu social sur niveau d'accessibilité (équité verticale) à travers le revenu des ménages. Des tests de comparaison statistiques sont utilisés (ANOVA de Welch, test de Tukey), ainsi que des outils propres à l'équité tels que les courbes de Lorenz et les coefficients de Gini.

Le chapitre suivant porte sur les indicateurs d'accessibilité aux différentes destinations, de la méthodologie aux résultats. Ensuite, le CHAPITRE 5 présente l'article intitulé *Pedestrian Accessibility in Montreal: the Determining Factors and the Level of Social Equity*. Le CHAPITRE 6 discute les résultats obtenus, avant de conclure le mémoire dans le CHAPITRE 7.

Dans cette étude, seule la Ville de Montréal est prise en compte (voir Figure 4.1). Les municipalités liées sont exclues, les données étant plus difficilement accessibles. En 2021, la Ville de Montréal comptait environ deux millions de personnes (Ville de Montréal, 2021b).

4.1.2 Échelle des îlots de diffusion

Sur la Figure 4.1 sont représentés les îlots de diffusion (Statistique Canada, 2021b), qui constituent l'échelle utilisée dans cette étude. Il s'agit de la plus petite échelle disponible depuis le recensement : ces îlots de diffusion sont délimités par le réseau routier et par des limites de régions géographiques normalisées (Statistique Canada, 2021a).

En effet, travailler à cette échelle permet de capturer au mieux les nuances qu'il peut exister sur le territoire en termes d'accessibilité piétonne. La zone d'étude compte initialement 11 109 îlots de diffusion (voir Figure 4.1).

4.1.3 Utilisation du sol

Il est également intéressant d'évaluer la répartition des différentes utilisations du sol. En effet, cette étude porte sur l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des courtes distances : il s'agit dans l'idée d'analyser l'accessibilité dont profitent les personnes depuis leur domicile, dans un souci de promouvoir ce modèle de ville compacte, qui encourage le développement de quartiers quasi-autonomes en termes de services de nécessité. L'accessibilité piétonne prend alors tout son sens lorsque celle-ci est calculée sur des zones susceptibles d'abriter une population qui va effectivement profiter d'une bonne accessibilité à pied pour satisfaire ses besoins du quotidien. En l'occurrence, des zones purement industrielles et commerciales présentent peu d'intérêt dans le cadre de cette étude : une accessibilité piétonne faible au sein de ces zones est attendue, dans la mesure où ces dernières ne sont pas la cible du modèle de la ville des courtes distances.

La Figure 4.2 présente la répartition des utilisations du sol sur le territoire d'étude à l'échelle des unités d'évaluation foncière (Ville de Montréal, 2023c), selon six catégories élaborées à partir de la littérature (Chang & Liao, 2011; Gong et al., 2020; Mavoa et al., 2018; Wo, 2019) : résidentiel, commercial, industriel, transport, services publics et inoccupé.

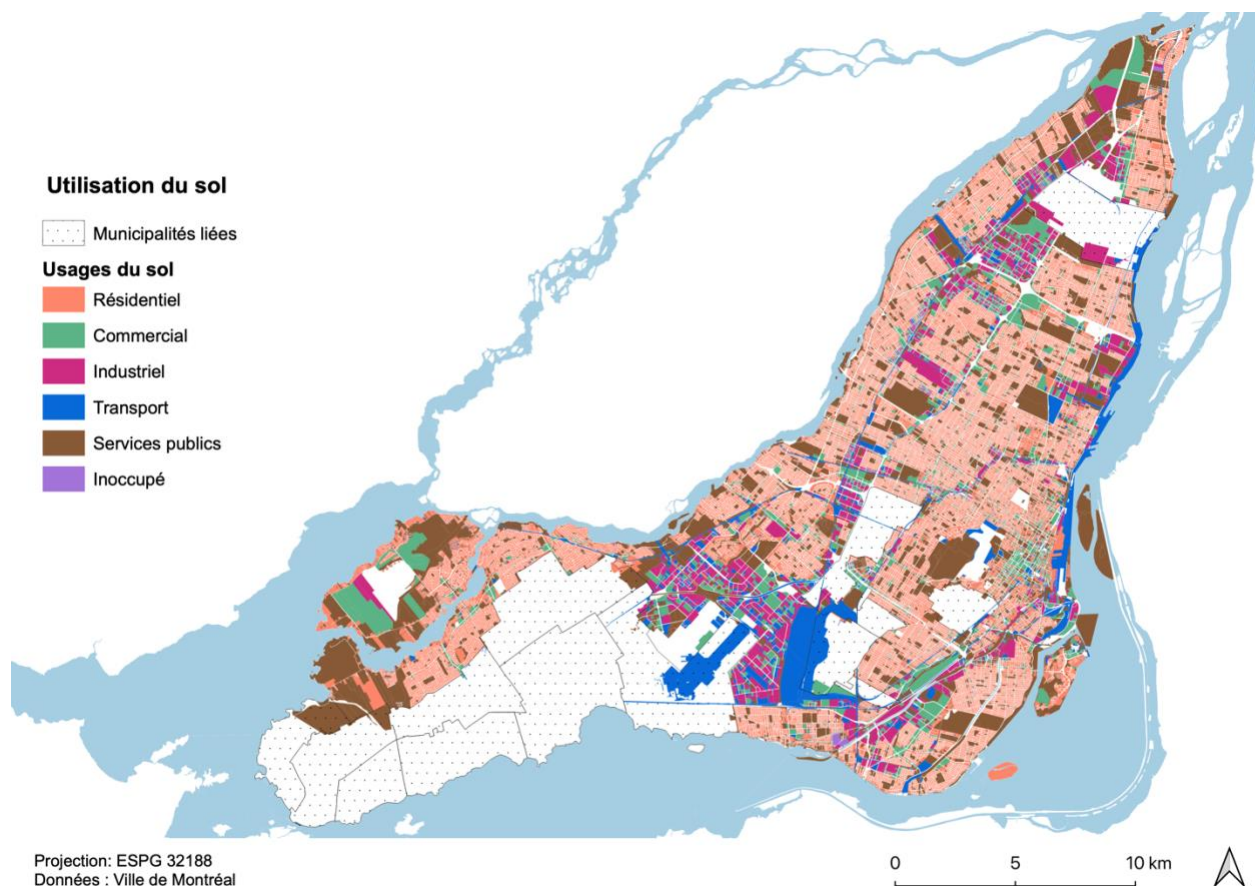


Figure 4.2 Carte des différents usages du sol

Comme le montre la Figure 4.2, la très grande majorité du territoire est dédiée au logement. Néanmoins, il est important de remarquer l’omniprésence, dans certains arrondissements, de zones industrielles et commerciales étendues, ou encore de vastes infrastructures liées au transport. C’est le cas notamment de l’arrondissement Saint-Laurent (voir Figure 4.1), dont une grande partie est dédiée à l’industrie (cette zone industrielle se prolonge sur l’arrondissement Lachine) ; un large entrepôt de conteneurs est également visible sur ces deux arrondissements (CTR International Inc., 2023). De la même façon, l’arrondissement d’Anjou possède d’importantes infrastructures commerciales (notamment le centre commercial Les Galeries D’Anjou) ainsi qu’un parc industriel. Ce type d’aménagement se retrouve aussi le long du Canal de Lachine, à l’est de Villieray, au sein de Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, dans une grande partie de Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles ou encore au sein de L’Île-Bizard-Sainte-Geneviève.

Enfin, certaines zones de la Figure 4.2 sont dépourvues d'usage : celles-ci représentent de grands espaces verts, des zones industrielles et commerciales, ou encore des infrastructure routières (notamment l'échangeur entre les autoroutes 25 et 40).

Comme cela a été évoqué précédemment, une accessibilité piétonne faible voire nulle au sein de ces zones ne sera pas surprenante : l'objectif est de caractériser la ville des courtes distances, c'est-à-dire d'envisager des déplacements piétons qui satisfassent les désirs et nécessités du quotidien à proximité du domicile.

4.2 Données et méthodes

Cette section vise à décrire la méthodologie employée pour la collecte et le traitement des données, ainsi que pour l'élaboration de la typologie de destinations et le calcul des scores d'accessibilité piétonne aux destinations.

4.2.1 Collecte et traitement des données

Caractériser l'accessibilité piétonne de la Ville de Montréal requiert des données sur la localisation des destinations, c'est-à-dire la longitude et la latitude de chacune des destinations d'intérêt. L'inventaire de ces points d'intérêt, proposé en premier lieu par la Ville de Montréal (qui est partenaire de ce projet), a ensuite été modifié par l'équipe de recherche de Polytechnique Montréal, afin de ne maintenir que les destinations jugées pertinentes dans le cadre de la ville de courtes distances et des déplacements piétons. Les destinations prises en compte sont présentées dans le Tableau 4.1, qui fournit également la source des bases de données. Il est à noter que le travail de collecte et de traitement des données a été réalisé en partenariat avec Karl El-Murr (Polytechnique Montréal) et José Arturo Jasso Chávez (Université McGill).

L'un des enjeux de cette étude concerne sa reproductibilité, afin de permettre à chacun de manipuler les mêmes données que celles utilisées et d'aboutir aux mêmes résultats. Dans ce cas, il est important de favoriser les données ouvertes accessibles à tous. C'est pour cette raison qu'à l'exception des données sur les garderies et CPE (DMTI, 2020) et sur les activités sportives intérieures (dont les données ont été communiquées directement par le Service des sports et des parcs) (Ville de Montréal, 2022a), toutes les tables qui référencent la localisation des destinations sont disponibles en données ouvertes, en majorité depuis le site de la Ville de Montréal et le portail Données Québec (voir Tableau 4.1).

Mis à part la localisation des bibliothèques, dont les données datent de 2017 et mériteraient certainement une révision, toutes les données utilisées dans cette étude ont été mises à jour en 2021 ou en 2022. En effet, il est primordial de baser l'analyse sur des données récentes, afin de produire des résultats représentatifs de la situation actuelle qui pourront alors éventuellement être utilisés pour des politiques publiques.

Tableau 4.1 Description des destinations prises en compte dans l'étude

Destination	Détail de la destination	Source et base(s) de données utilisées
Bibliothèques	Bibliothèques	Lieux culturels municipaux de Montréal (Ville de Montréal, 2017)
Activités culturelles	Centres culturels Maisons de la culture Scènes de théâtre extérieures Musées	Lieux culturels municipaux de Montréal (Ville de Montréal, 2017) et Locaux commerciaux et statuts d'occupation (Ville de Montréal, 2021a)
Garderies et CPE	Garderies privées subventionnées Garderies privées non-subventionnées Centres de la petite enfance	(DMTI, 2020)
Services de maternelle 4 ans	Établissements publics et privés comportant au moins une section préscolaire	Localisation des établissements d'enseignement du réseau scolaire au Québec (Données Québec, 2022b)
Établissements scolaires primaires	Établissements publics et privés comportant au moins une section d'enseignement primaire	Localisation des établissements d'enseignement du réseau scolaire au Québec (Données Québec, 2022b)
Établissements scolaires secondaires	Établissements publics et privés comportant au moins une section d'enseignement secondaire	Localisation des établissements d'enseignement du réseau scolaire au Québec (Données Québec, 2022b)
Établissement post-secondaires	Enseignement supérieur (CÉGEP, Université) Centres de formation professionnelle et d'éducation aux adultes Centres de formation professionnelle et d'éducation aux adultes	Localisation des établissements d'enseignement du réseau scolaire au Québec (Données Québec, 2022b)
Activités sportives intérieures	Piscines intérieures Aréna Centres et complexes sportifs	Données brutes du <i>Service des sports et des parcs</i> (Ville de Montréal, 2022a)
Équipements de santé et de services sociaux	CLSC / GMF Cliniques médicales	Fichiers cartographiques M02 des installations et établissements (Données Québec, 2022a)
Zones commerciales	Artères et zones commerciales Centres commerciaux	Locaux commerciaux et statuts d'occupation (Ville de Montréal, 2021a)
Commerces alimentaires	Épiceries Épiceries spécialisées Marchés publics	Carte des marchés publics de Montréal (Marchés publics de Montréal, 2022) et Établissements alimentaires (Ville de Montréal, 2022b)
Pharmacies	Pharmacies	Locaux commerciaux et statuts d'occupation (Ville de Montréal, 2021a)
Parcs de quartier	Parcs métropolitains Parcs nature et arboretum Parcs urbains Parcs nationaux et lieux historiques Parcs de quartier Places publiques Parcs de voisinage Bandes riveraines Parcs linéaires Squares	Grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics (Ville de Montréal, 2022c)
Grands parcs	Parcs métropolitains Parcs nature et arboretum Parcs urbains Parcs nationaux et lieux historiques	Grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics (Ville de Montréal, 2022c)
Aires de jeu	Aires de jeu (18 mois - 5 ans) Aires de jeu (5 - 12 ans) Aires de jeu (combiné) Aires de jeu (adolescents) Parc et cours d'école	Grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics (Ville de Montréal, 2022c) et Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures (Ville de Montréal, 2022d)

Tableau 4.1 Description des destinations prises en compte dans l'étude (suite)

Destination	Détail de la destination	Source et base(s) de données utilisées
Activités – Nature	Abris soleil Aires de pique-nique Jardins botaniques Grèves / Plages	Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures (Ville de Montréal, 2022d)
Activités extérieures – Aquatiques	Piscine extérieure Pataugeoire et jeux d'eau	Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures (Ville de Montréal, 2022d)
Activités extérieures – Hiver	Abris soleil Aires de pique-nique Jardins botaniques Grèves / Plages Aires de glissade sur neige Anneaux / Ronds de glace Patinoires 4 saisons Patinoires réfrigérées Patinoires avec bandes Patinoires sans bandes Sentiers de ski de fond Sentiers de raquette Sentiers pédestres et sentiers multifonctionnels Parcs à chien, aires d'exercice et d'agilité canine	Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures (Ville de Montréal, 2022d)
Activités extérieures – Été	Abris soleil Aires de pique-nique Jardins botaniques Grèves / Plages Baseball et Balle-molle Balle au mur Basketball (terrain complet et pastille) Football américain Rugby Soccer (toute taille confondue) Tennis Volleyball de plage Bocce, boulingrin, fer, palet et pétanque Cricket Croquet Ping-Pong Planchers de danse Aires de tir à l'arc Aires de planche à roulette, roller-blade et trottinette Pistes et aires de lancer d'athlétisme Pistes et circuits pour pratique du vélo (Pump- track, BMX, vélodrome, circuit fermé) Sentiers pédestres et sentiers multifonctionnels Aires d'entraînement pour adulte et module d'entraînement en plein air (ex : module de callisthénie, Benchfit, défis-obstacle) Marinas, rampes de mise à l'eau, descentes aménagées et quais (tant pour embarcation motorisée que pour canot, kayak, planche à pagaie, surf de rivière) Blocs et murs d'escalade Aires de pêche autorisée Parcs à chien, aires d'exercice et d'agilité canin Patinoires 4 saisons	Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures (Ville de Montréal, 2022d)

Bibliothèques et activités culturelles

Le recensement des bibliothèques est effectué en filtrant les données de la table des *Lieux culturels municipaux de Montréal* (Ville de Montréal, 2017). Les scènes de théâtre extérieures, les entités décrites comme « Salle de spectacle » et « Théâtre » sont sélectionnées dans la même base des *Lieux culturels municipaux de Montréal* (Ville de Montréal, 2017) ; en revanche, les données ne spécifient pas s'il s'agit de lieux extérieurs ou intérieurs. De plus, afin de ne pas considérer uniquement les installations municipales, mais de prendre également en compte les entités privées, les établissements identifiés comme « Théâtres » dans la liste des *Locaux commerciaux et statuts d'occupation* (Ville de Montréal, 2021a) sont également considérés.

Garderies et Centres de la petite enfance (CPE)

En ce qui concerne les garderies et CPE, le filtrage des données est fait sur le code SIC1 tel que SIC1 soit égal à 8351 (DMTI, 2020).

Établissements scolaires

Afin d'identifier les services de maternelle 4 ans, les établissements comportant au moins une section préscolaire sont sélectionnés ; ces écoles peuvent donc également proposer une filière primaire, voire secondaire. Il y a donc naturellement des doublons entre les catégories des établissements préscolaire, primaire et secondaire. Le fichier fourni par Données Québec (2022b) au sujet des établissements scolaires est un fichier au format *.shp*, depuis lequel il est possible d'extraire des tables à l'aide d'un logiciel de géomatique (la version 3.22.14-Białowieża de QGIS est utilisée dans cette étude). Parmi ces tables, certaines pointent les établissements publics (table intitulée « PPS_Public_Ecole ») et d'autres les établissements privés (table intitulée « PPS_Prive_Installation ») ; il suffit donc de les regrouper afin d'inclure à la fois les établissements publics et privés. Exactement le même raisonnement est appliqué aux établissements scolaires primaires et secondaires, avec cette fois la prise en compte des écoles comportant respectivement au moins une filière primaire, et au moins une filière secondaire.

Les données concernant les établissements post-secondaires proviennent du même fichier que celui des autres établissements scolaires. Ici, les établissements collégiaux (table intitulée « ES_Collegial »), universitaires (table « ES_Universitaire ») et les centres de formation professionnelle d'éducation aux adultes (tables « PPS_Public_Ecole » et « PPS_Prive_Installation », filtrées sur les catégories « Éducation aux adultes » et « Formation

professionnelle ») sont sélectionnés, avec un filtrage sur la localisation pour ne considérer que la Ville de Montréal.

Activités sportives intérieures

Les lieux relatifs aux activités sportives intérieures sont référencés sous la dénomination « Sport » dans la base de données fournie par le Service des sports et des parcs de la Ville de Montréal (2022a).

Équipements de santé et de services sociaux

Concernant la santé et les services sociaux, les établissements de santé sont considérés, et non les installations, dans la mesure où un établissement comprend potentiellement plusieurs installations ; l'objectif ici est de mesurer l'accessibilité aux établissements de santé eux-mêmes, et non aux services internes qu'ils fournissent.

Zones commerciales

Les zones commerciales sont caractérisées par deux indicateurs provenant de la base de données relative à l'occupation commerciale de la Ville de Montréal (2021a) : les centres commerciaux et les rues commerçantes. Ensuite, seuls les commerces situés dans un rayon de 25 mètres du fichier de forme de la rue commerciale sont sélectionnés. Ces deux indicateurs peuvent finalement être additionnés et agrégés au niveau des îlots de diffusion. Ainsi, les zones commerciales désignent le nombre d'emplacements commerciaux (rues et centres), en utilisant à la fois les centroïdes des centres commerciaux, et les rues commerciales.

Commerces alimentaires

Recenser les commerces alimentaires nécessite deux sources de données : la première, fournie par la Ville de Montréal (2022b), concerne les établissements alimentaires, notamment les épiceries et épiceries spécialisées (le filtrage comprend les aliments naturels, boucheries-épiceries, boucheries, boulangeries, charcuteries, charcuterie/fromage, marchés publics, poissonneries, supermarchés) ; la seconde source correspond au site web des Marchés Publics de Montréal (2022) sur lequel tous les marchés publics sont géoréférencés.

Pharmacies

Au sujet des pharmacies, les données de la Ville de Montréal relatives à l'occupation commerciale (2021a) permettent de filtrer les résultats selon le code SCIAN, ici égal à 446110 pour ne considérer que les pharmacies.

Parcs, activités extérieures et aires de jeu

La prise en compte des parcs requiert en revanche davantage de manipulations. Les données relatives aux parcs de quartier, aux grands parcs et aux parcs et cours d'école (aires de jeu) sont issues de la base *Grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics* mise à disposition par la Ville de Montréal (2022c). Néanmoins, ces parcs sont représentés sous forme de polygones, ce qui complique le calcul de l'accessibilité. La méthode employée est alors la suivante : il s'agit de distribuer des points sur le périmètre de chacun des parcs, séparés de 20 mètres, avant d'identifier les points situés à moins de 30 mètres d'un lien routier ; les points sélectionnés constituent des points d'entrée ou d'accès aux parcs. Enfin, l'extraction des données relatives aux aires de jeu (hors parcs et cours d'école) et aux activités extérieures ne présente pas de difficulté particulière.

4.2.2 Élaboration de la typologie de destinations

À partir des destinations recensées (voir Tableau 4.1), il est possible de créer une typologie de destinations. Pour ce faire, la littérature a permis d'identifier les typologies généralement utilisées dans des études similaires : l'éducation, la santé, et la récréation (Apparicio & Séguin, 2006; Mavoa et al., 2012), les commerces (Tahmasbi & Haghshenas, 2019) et la culture (Cortés, 2021). La typologie utilisée dans cette étude est présentée dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Typologie de destinations

Destination	Description
Culture	Bibliothèques Activités culturelles (maisons de la culture, théâtres, centres culturels, musées)
Éducation	Garderies et CPE Services de maternelle 4 ans Établissements scolaires primaires Établissements scolaires secondaires Établissements post-secondaires
Santé et services sociaux	Équipements de santé et de services sociaux Pharmacies
Zones commerciales	Zones commerciales

Tableau 4.2 Typologie de destinations (suite)

Destination	Description
Commerces alimentaires	Commerces alimentaires
Activités sportives et récréatives	Parcs de quartier Grands parcs Aires de jeu Activités sportives intérieures Activités – Nature Activités extérieures – Aquatiques Activités extérieures – Hiver Activités extérieures – Été

4.2.3 Mesure de l’accessibilité piétonne aux destinations

4.2.3.1 Méthode des opportunités cumulées

La méthode choisie pour le calcul de l’accessibilité est celle des *opportunités cumulées*, qui repose sur les équations (2.3) et (2.4) introduites en section 2.3.2. En effet, cette mesure ne présente pas de difficulté particulière dans les données requises et dans le calcul en lui-même, et présente l’avantage de fournir des résultats faciles à interpréter, à la fois pour les chercheurs, les représentants politiques et le public (Geurs & van Wee, 2004).

Dans cette méthode, il est nécessaire de choisir un seuil, au-delà duquel l’accessibilité sera considérée comme nulle. Dans cette étude, un seuil de 15 minutes est choisi. En effet, ce seuil est notamment utilisé dans une étude portant sur la ville de Monterrey, au Mexique (Gaxiola-Beltrán et al., 2021) : les auteurs montrent qu’à partir de 15 minutes, environ 90% des zones étudiées ont accès à l’école publique la plus proche ; les auteurs considèrent également un seuil de 15 minutes pour rejoindre les supermarchés et les centres d’emploi à pied. Le cadre théorique de la *ville des courtes distances* suppose en effet des distances de marche comprises entre 15 et 20 minutes (Capasso Da Silva et al., 2019; Logan et al., 2022).

4.2.3.2 Calcul des temps de parcours

Il est à noter les calculs des temps de parcours et du nombre de destinations accessibles depuis chaque îlot de diffusion, sont le fruit du travail de José Arturo Jasso Chávez, de l’Université McGill, membre de l’équipe de recherche ayant travaillé sur le projet. Cette section vise simplement à décrire la méthodologie employée.

4.2.3.2.1 Idée générale

La Figure 4.3 décrit de façon simplifiée la méthode employée pour le calcul des indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations. Il s'agit premièrement de calculer les centroïdes de tous les îlots de diffusion de la Ville de Montréal. À partir de ces centroïdes, il suffit ensuite de calculer le temps de déplacement sur le réseau piéton, depuis chaque îlot, vers tous les autres îlots. Si le temps de trajet est inférieur ou égal à 15 minutes, alors il est considéré que l'îlot de diffusion de départ garantit l'accessibilité à l'ensemble des destinations incluses dans les îlots d'arrivée.

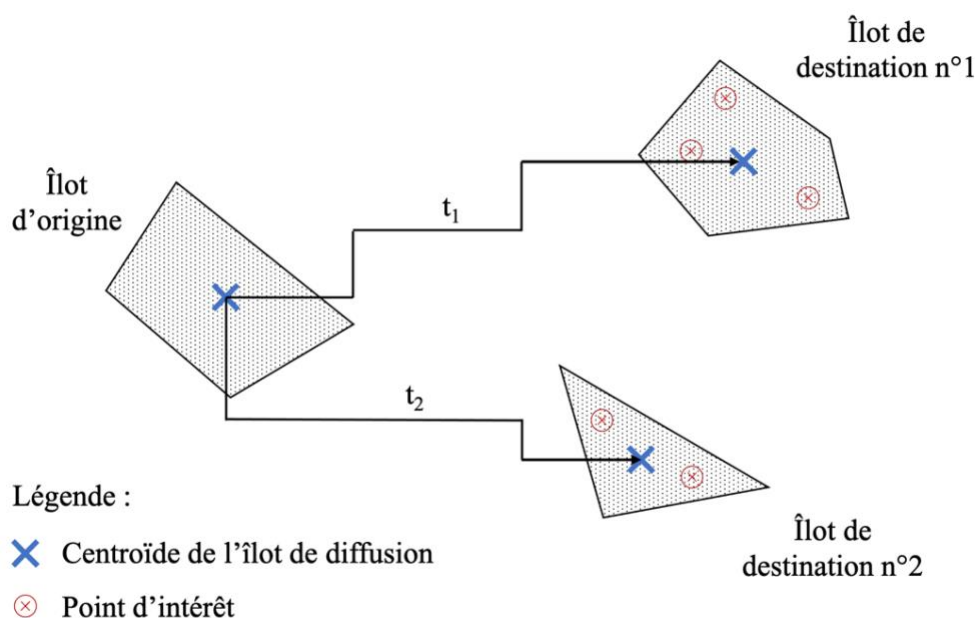


Figure 4.3 Description schématique de la mesure de l'accessibilité utilisée dans l'étude (source : Julien Verdier)

Sur la Figure 4.3, en admettant par exemple que $t_1 < 15$ min et $t_2 > 15$ min, alors la méthode des opportunités cumulées indique que les personnes habitant dans « l'îlot d'origine » ont accès aux trois points d'intérêts inclus dans « l'îlot de destination n°1 », mais pas à ceux de « l'îlot de destination n°2 ».

4.2.3.2.2 Génération des matrices de temps de parcours

Plus précisément, chaque paire origine/destination (au niveau des centroïdes des îlots de diffusion) se voit attribuer une matrice de temps de parcours. Ces matrices sont générées à partir de l'outil

Realistic Routing with R5 in R (r5r) (Pereira et al., 2021), un package du logiciel de programmation R (fonction *travel_time_matrix*) (R Core Team, 2023). Le réseau est quant à lui créé à partir du réseau de rues *OpenStreetMap*.

Pour le calcul des temps de parcours, le centroïde de chaque îlot de diffusion est assigné à la route la plus proche, dans un rayon de 300 mètres ; si aucune route n'est disponible, le rayon est augmenté à 1.6 km. Dans le cas où aucune route n'est située au sein de ce rayon, alors le centroïde en question n'est pas pris en compte, et l'îlot associé est exclus de l'étude. Cette difficulté est naturellement d'autant plus probable que l'îlot de diffusion est étendu, et dépend également du mode de transport considéré, dans la mesure où certaines voies sont impraticables selon le mode (par exemple, une autoroute ne peut pas être empruntée par un piéton).

Dans cette étude, aucune contrainte susceptible d'impacter le temps de trajet à pied n'est prise en compte, qu'il s'agisse du type de route, du coût d'un virage, de la traversée d'une intersection ou du niveau de trafic.

Enfin, toutes les destinations contenues dans chaque îlot sont comptabilisées, et il devient alors possible de déterminer le nombre de destinations accessibles depuis chaque îlot : dès lors que le temps de trajet à pied qui sépare les centroïdes d'un îlot de départ et d'un îlot d'arrivée est inférieur ou égal à 15 minutes, l'îlot de départ garantit l'accessibilité à toutes les destinations contenues dans l'îlot d'arrivée. Ainsi, à chaque îlot de diffusion est associé le nombre de destinations accessibles à pied, et ce pour chacune des six catégories de destinations (voir Tableau 4.2).

4.2.3.2.3 *Données invalides*

La catégorie des données invalides rassemble les îlots pour lesquels il n'a pas été possible de générer de matrice de temps de parcours. En effet, la partie précédente (4.2.3.2.2) mentionne le fait que la configuration du réseau aux alentours d'un îlot de diffusion n'est pas toujours praticable à pied : dans ce cas, le lien routier le plus proche ne peut être sélectionné pour le calcul du temps de parcours, et l'îlot en question ne peut être pris en compte dans l'étude. Sur les cartes d'accessibilité (section 4.3.2), ces îlots sont rassemblés sous la dénomination *Données invalides*.

4.2.3.3 Calcul des scores d'accessibilité

Une fois le nombre de destinations accessibles depuis chaque îlot obtenu, il est intéressant de créer un score d'accessibilité. Pour ce faire, la côte z (*z-score* en anglais), défini dans l'équation (3.1), est utilisé :

$$z_{score}(x_{ij}) = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma(x_j)} \quad (4.1)$$

où x_{ij} représente le nombre d'opportunités accessibles depuis l'îlot i pour la catégorie de destination notée $j \in \llbracket 1,6 \rrbracket$, $\bar{x}_j$ est la moyenne de la distribution du nombre d'opportunités accessibles pour la catégorie de destination j (au niveau des îlots de diffusion), $\sigma(x_j)$ désigne l'écart-type de cette distribution.

Il est maintenant possible de situer le niveau d'accessibilité de chaque îlot. En effet, la côte z a pour effet de centrer et de réduire la distribution associée à chaque destination : la moyenne est nulle, et l'écart-type vaut 1. Ainsi, un îlot dont la côte z est négative possèdera un niveau d'accessibilité inférieur à la moyenne (obtenue sur tous les îlots), tandis qu'un îlot avec un score positif offrira une accessibilité piétonne meilleure que la moyenne. Ce score facilite la comparaison entre les îlots de diffusion.

4.3 Résultats et discussion

La présente section vise à présenter les indicateurs d'accessibilité piétonne obtenus sur le territoire d'étude de la Ville de Montréal, tout d'abord à travers quelques statistiques descriptives, puis à l'aide de cartes d'accessibilité.

4.3.1 Statistiques descriptives des scores d'accessibilité

Le Tableau 4.3 présente, pour chaque catégorie de destination, le nombre d'opportunités accessibles à pied depuis les îlots de diffusion. Pour chacune des catégories, le niveau d'accessibilité est divisé en quintiles : les îlots appartenant au premier quintile sont ceux qui présentent le plus faible niveau d'accessibilité pour la catégorie considérée, et l'accessibilité s'améliore au fur et à mesure des quintiles.

Tableau 4.3 Nombre d'opportunités accessibles depuis les îlots de diffusion, pour chaque catégorie de destination

Destination	Nombre de destinations accessibles				
	1 ^e quintile	2 ^e quintile	3 ^e quintile	4 ^e quintile	5 ^e quintile
Culture	0	0	0 - 10	-	-
Santé et services sociaux	0 - 0	0 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 11
Éducation	0 - 3	3 - 6	6 - 9	9 - 15	15 - 54
Zones commerciales	0 - 1	1 - 21	21 - 68	68 - 157	157 - 873
Zones commerciales	0 - 1	1 - 5	5 - 9	9 - 17	17 - 82
Activités sportives et récréatives	0 - 10	10 - 16	16 - 21	21 - 28	28 - 70
Niveau d'accessibilité (relatif)	Faible		→		Élevé

Il est important de noter que les expressions « Accessibilité faible » et « Accessibilité élevée » ne sont pas des notions absolues, mais relatives à chaque catégorie de destination. Pour deux catégories de destinations, ces expressions ne désigneront pas la même quantité d'opportunités accessibles à pied. La normalisation des valeurs et la création des quintiles permettent de comparer aisément les niveaux d'accessibilité à une même catégorie de destination, et de comparer les tendances sur le territoire entre les différentes catégories de destinations.

La Figure 4.4 représente les graphiques en violons des scores d'accessibilité relatifs à chacune des six catégories de destinations. Ce genre de graphique permet de représenter la distribution de l'accessibilité.

Il apparaît que l'accessibilité piétonne est globalement faible sur le territoire, avec plus de 50% des valeurs (et donc des îlots de diffusion) bénéficiant d'un score inférieur à la moyenne (c'est-à-dire une côte z négative). L'accessibilité à la culture est en quelque sorte discontinue, ce qui est en partie dû à un nombre de données limité (164 lieux culturels recensés, le plus faible effectif parmi les six catégories de destinations). Ce résultat suppose que les lieux culturels sont concentrés sur certaines zones de Montréal, impliquant des scores très élevés pour un petit nombre d'îlots de diffusion, et des scores très bas pour la majorité, d'où la position exceptionnelle de la médiane.

L'accessibilité piétonne à la santé et aux services sociaux est globalement mieux répartie, bien que des pics d'accessibilité se remarquent, supposant là aussi une certaine discontinuité dans la distribution spatiale de l'accessibilité.

Concernant l'éducation, l'accessibilité semble être distribuée de façon plus continue sur le territoire. L'accessibilité y est également globalement meilleure que pour les deux catégories de destinations précédentes.

Les résultats quant aux zones commerciales et aux commerces alimentaires sont relativement semblables : l'accessibilité piétonne est globalement faible pour une majorité des îlots de diffusion, et suppose une certaine concentration de l'accessibilité dans certains quartiers.

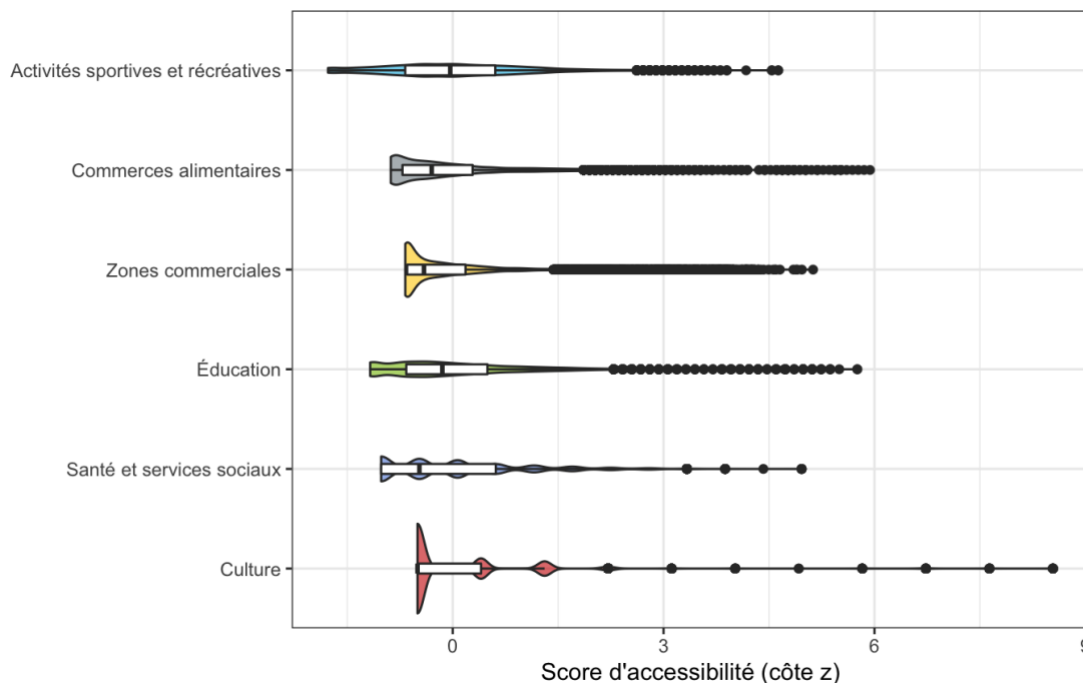


Figure 4.4 Graphiques en violons des indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations

Enfin, l'accessibilité aux activités sportives et récréatives est la plus équitablement répartie, séparant les îlots en deux groupes de même taille : un premier groupe qui rassemble les îlots ayant un score inférieur à la moyenne, et un second groupe pour les îlots présentant un score supérieur à la moyenne. En ce sens, aucune discontinuité notable ne semble exister dans la répartition spatiale de l'accessibilité.

4.3.2 Cartes d'accessibilité

Afin d'évaluer la répartition spatiale de l'accessibilité piétonne, six cartes sont réalisées pour les six catégories de destinations, à l'aide du logiciel de système d'information géographique QGIS

(version 3.22.14-Białowieża). À l'exception de la culture, toutes les cartes classent les îlots de diffusion en quintiles, en fonction du score d'accessibilité obtenu.

4.3.2.1 Accessibilité piétonne à la culture

Comme le montre la Figure 4.5, la culture est distribuée de manière éparse sur le territoire. Le territoire de la Ville de Montréal observe donc essentiellement deux types de quartiers concernant la culture : les quartiers qui n'ont accès à aucune destination culturelle, et les quartiers qui disposent d'au moins une destination culturelle (et au plus dix) à moins de 15 minutes à pied. En effet, plus de 69% des îlots offrent une accessibilité nulle à la culture.

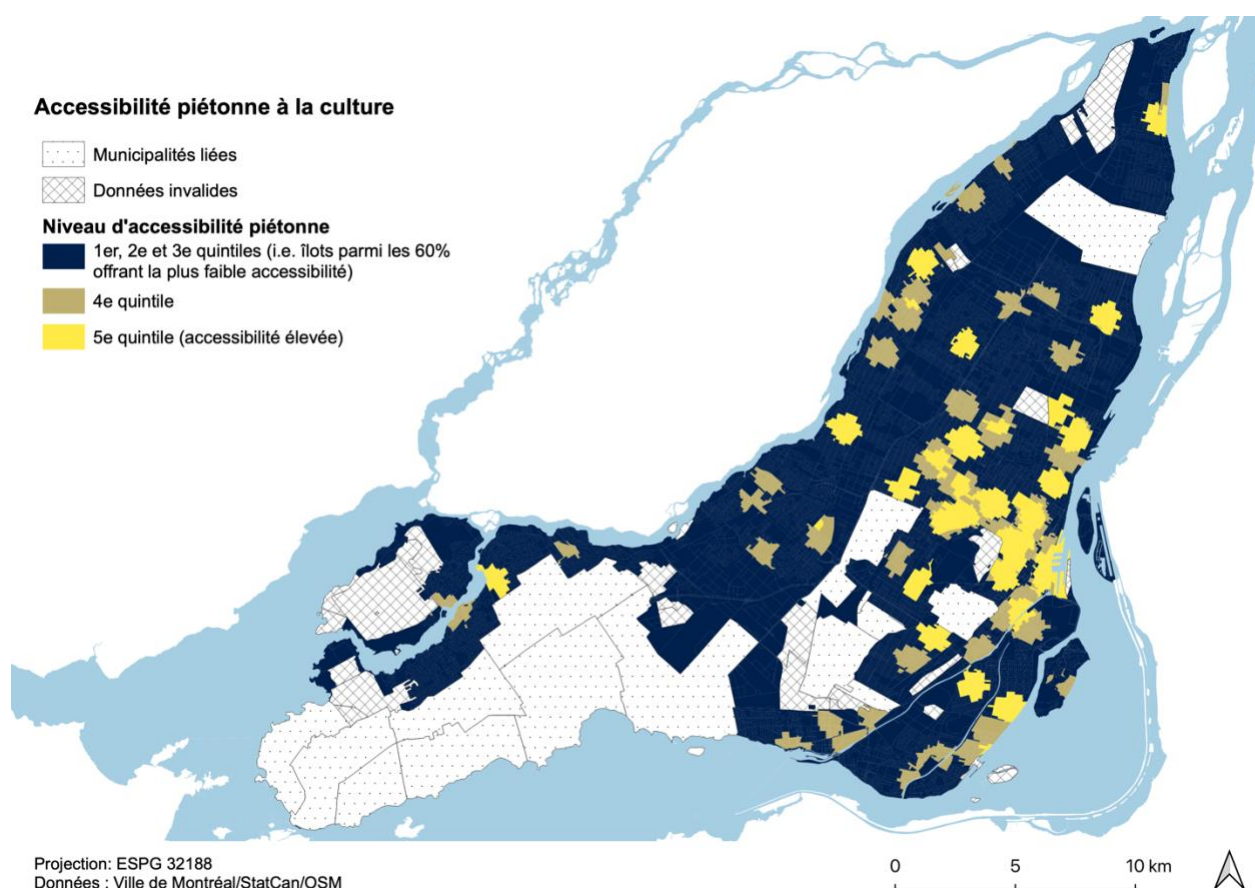


Figure 4.5 Carte de l'accessibilité piétonne à la culture

Sur la Figure 4.5, seules trois catégories sont représentées : les 60% des îlots offrant la moins bonne accessibilité à la culture (en l'occurrence aucune destination accessible à pied), les 20% suivants (qui comptent au maximum une destination culturelle à moins de 15 minutes de marche) et les derniers 20% offrant l'accessibilité maximale (jusqu'à dix lieux culturels).

Les destinations culturelles sont concentrées dans le Centre-ville de Montréal, le Vieux-Montréal ainsi que le Plateau-Mont-Royal.

4.3.2.2 Accessibilité piétonne à la santé et aux services sociaux

L'accessibilité aux équipements de santé et de services sociaux est davantage répartie sur le territoire, comme le montre la Figure 4.6. Bien que l'accessibilité soit concentrée dans les quartiers du Centre-ville de Montréal, du Plateau-Mont-Royal, de Côte-des-Neiges, de Villeray et de Rosemont, d'autres zones plus excentrées bénéficient d'une accessibilité correcte voire élevée.

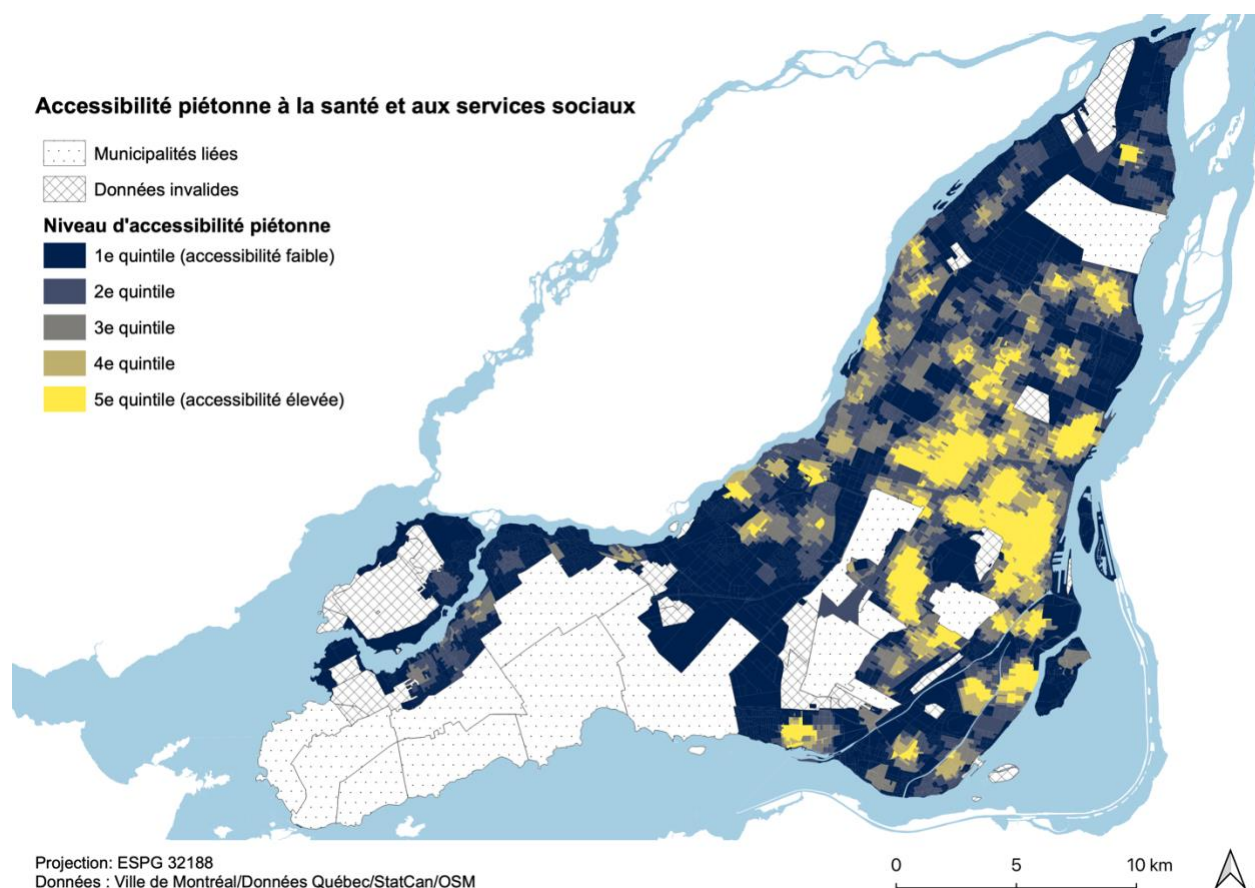


Figure 4.6 Carte de l'accessibilité piétonne à la santé et aux services sociaux

Trois zones principales observent néanmoins des niveaux d'accessibilité piétonne très faibles : les secteurs municipaux de Rivière-des-Prairies, de Pointe-aux-Trembles, de L'Île-Bizard et de Pierrefonds-Roxboro. Ces quartiers très majoritairement résidentiels sont les plus excentrés, et pâtissent d'un manque de services de proximité qu'il serait possible de rejoindre à pied. Cela suppose que les habitants de ces arrondissements utilisent d'autres moyens de transport, et en

particulier la voiture. C'est ce que soutient l'Enquête Origine-Destination de 2018 (ARTM, 2020), qui indique que les secteurs municipaux de Rivière-des-Prairies et Pointe-aux-Trembles enregistrent respectivement des parts modales (sur 24 heures) de 74.4% et 72.8% pour la voiture, et de seulement 4.2% et 7.4% pour les modes non motorisés ; sur l'Île-Bizard, les parts modales de la voiture et des modes non motorisés sont respectivement de 84.0% et 4.7%. À Pierrefonds, ces chiffres s'élèvent respectivement à 80.2% et 4.2% ; enfin, ils sont respectivement de 77.8% et 5.6% à Roxboro. À titre de comparaison, la part modale de l'automobile au sein du Plateau-Mont-Royal est de 28.4%, tandis que les modes non motorisés représentent une part modale de 41.6%.

De plus, comme cela a été expliqué dans la section 4.1.3, il faut noter que plusieurs quartiers affichent une accessibilité faible, mais sont en réalité des zones industrielles et commerciales. Il n'est donc pas surprenant que l'accessibilité au sein de ces quartiers soit mauvaise. En outre, ce constat ne témoigne pas forcément d'une faiblesse du territoire. L'accessibilité piétonne telle qu'étudiée dans ce travail, est envisagée dans le cadre de la ville des quinze minutes, et n'a donc de sens que dans les quartiers habités.

4.3.2.3 Accessibilité piétonne à l'éducation

En ce qui concerne l'éducation, la Figure 4.7 montre une forte continuité de l'accessibilité piétonne sur le territoire : les zones à forte accessibilité sont relativement bien reliées entre elles par des quartiers à l'accessibilité moins élevée. Ce constat est positif, car il signifie que l'accessibilité à l'éducation ne s'arrête pas aux quartiers centraux qui disposent de nombreux services. En l'occurrence, la Figure 4.7 dénote une forte accessibilité aux écoles depuis des quartiers résidentiels davantage excentrés (Figure 4.2), situés vers Montréal-Nord, Ahuntsic-Cartierville, Saint-Laurent, Mercier-Hochelaga-Maisonneuve ou encore Verdun.

De la même façon que pour la santé et les services sociaux (4.3.2.2), les quartiers résidentiels les plus excentrés bénéficient en revanche d'une très faible accessibilité piétonne, tandis que la voiture reste le mode de transport privilégié de leurs habitants (ARTM, 2020).

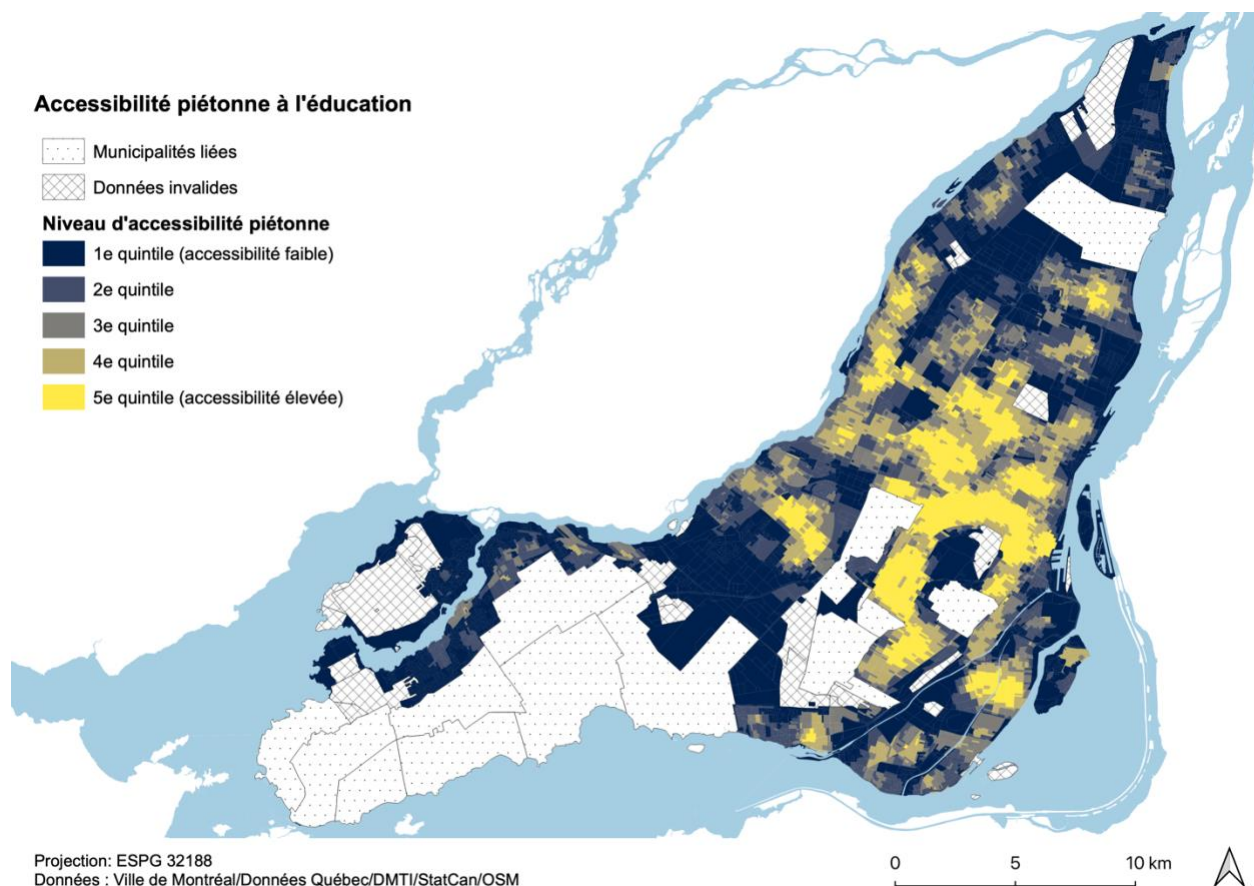


Figure 4.7 Carte de l'accessibilité piétonne à l'éducation

4.3.2.4 Accessibilité piétonne aux zones commerciales

Au sujet des zones commerciales, le constat est légèrement différent. La Figure 4.8 montre une concentration extrême de l'accessibilité autour du Centre-ville, du Plateau-Mont-Royal, de Rosemont et de Villieray. Ces quartiers sont en effet organisés autour des principales artères commerciales de la ville, en particulier la rue Sainte-Catherine et la rue Saint-Denis. Les quartiers légèrement excentrés, davantage résidentiels, profitent d'une bonne accessibilité aux zones commerciales, mais globalement moins élevée que l'accessibilité à la santé et à l'éducation : la distribution de l'accessibilité aux zones commerciales est moins équitablement répartie sur le territoire, bien que la zone centrale qui concentre la plus forte accessibilité soit plus étendue.

Ces résultats corroborent les observations faites à partir de l'utilisation du sol (Figure 4.2) : les quartiers bénéficiant de la meilleure accessibilité piétonne possèdent une multitude de commerces

« à taille humaine », de petite surface, répartis sur les différentes rues ; ce sont des commerces de proximité. Les zones disposant uniquement de grandes aires commerciales se révèlent d'ailleurs être celles présentant la moins bonne accessibilité piétonne.

Une fois de plus, la prédominance de la voiture au sein des quartiers résidentiels de banlieue va de pair avec une faible accessibilité piétonne aux zones commerciales.

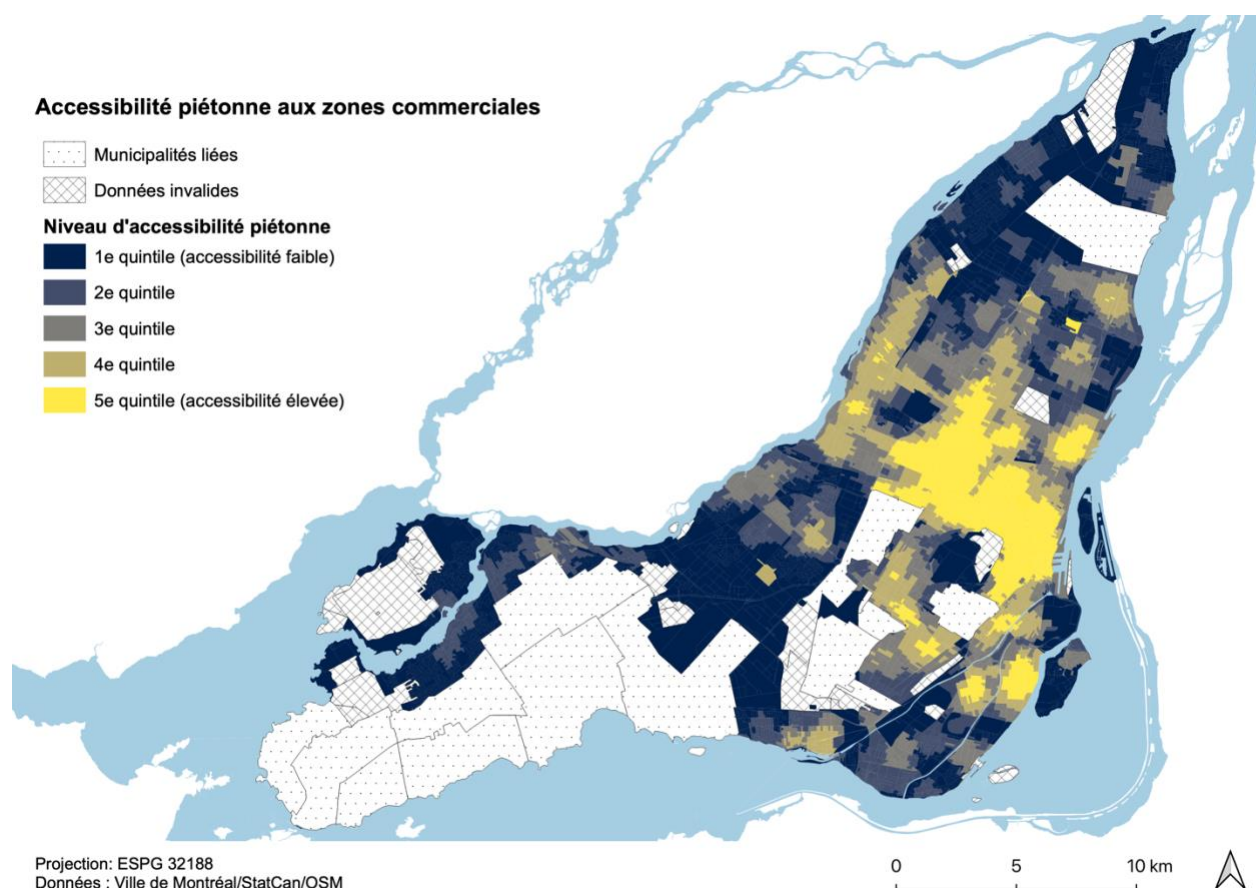


Figure 4.8 Carte de l'accessibilité piétonne aux zones commerciales

4.3.2.5 Accessibilité piétonne aux commerces alimentaires

Comme le montre la Figure 4.9, l'accessibilité aux commerces alimentaires suit la même tendance que l'accessibilité aux zones commerciales.

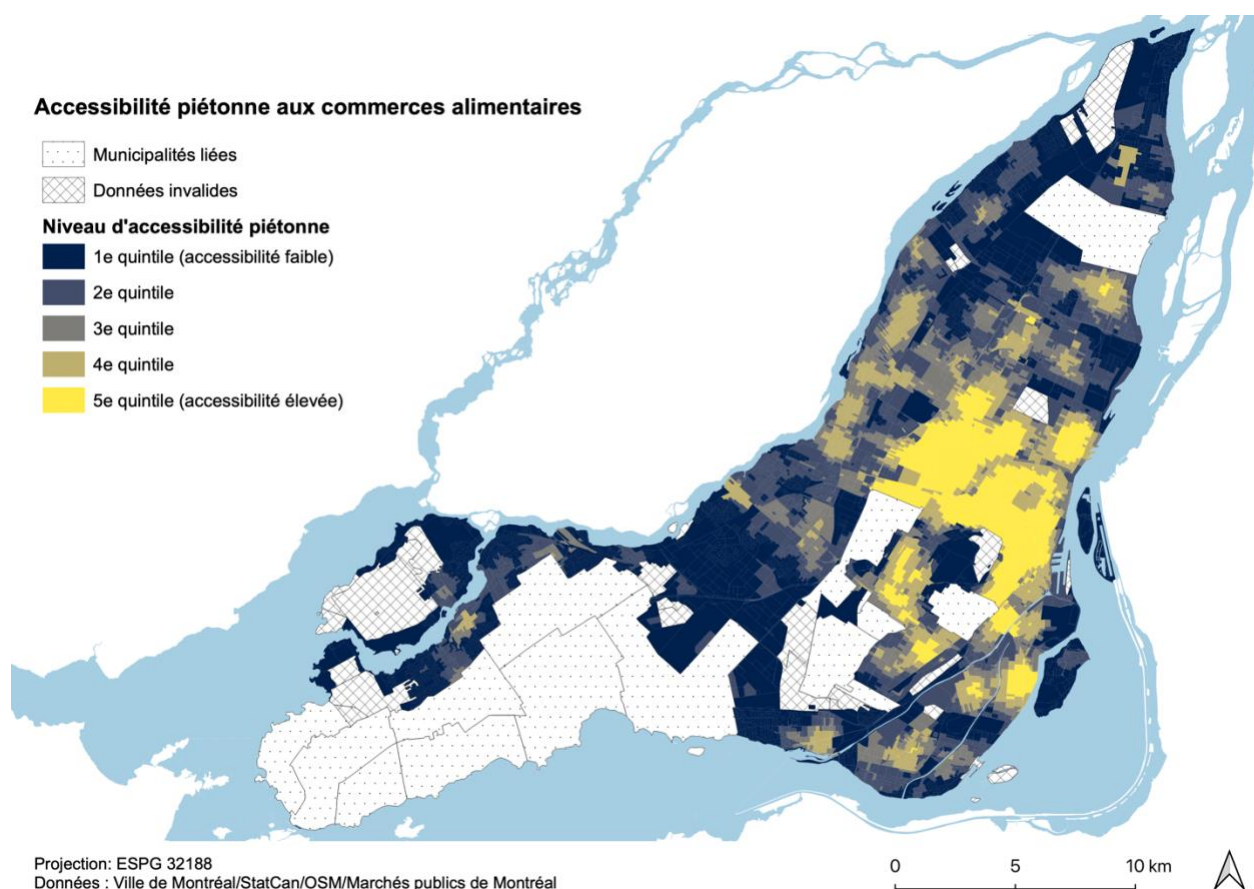


Figure 4.9 Carte de l'accessibilité piétonne aux commerces alimentaires

4.3.2.6 Accessibilité piétonne aux activités sportives et récréatives

L'accessibilité piétonne aux activités sportives et récréatives présente un profil tout à fait différent de ceux observés jusqu'à maintenant. La Figure 4.10 montre une répartition de l'accessibilité bien plus étendue, mettant notamment en lumière des quartiers jusqu'alors plus ou moins ignorés, et qui profitent maintenant de scores d'accessibilité parmi les plus élevés. Il s'agit en particulier des quartiers situés dans les arrondissements de Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles, de l'Île-Bizard-Sainte-Genève et de Pierrefonds-Roxboro. À l'inverse, bien que les quartiers centraux offrent une accessibilité globalement élevée, le Centre-ville quant à lui présente une accessibilité extrêmement faible : ce résultat n'a rien de surprenant au vu de la forme urbaine de ce quartier, qui est avant tout un centre d'affaire, qui dispose de très peu de parcs et d'espaces dédiés au sport ou aux loisirs.

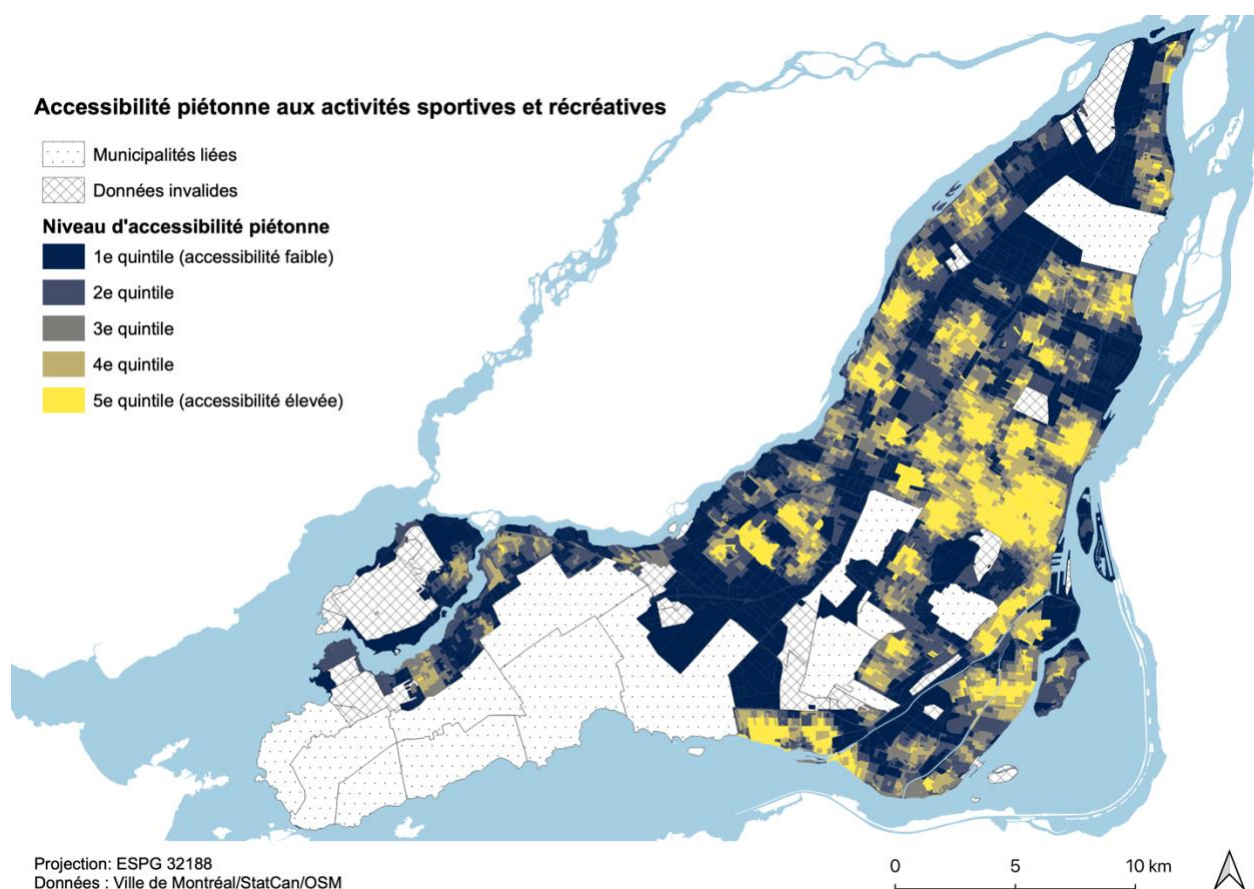


Figure 4.10 Carte de l'accessibilité piétonne aux activités sportives et récréatives

Cette excellente couverture du territoire s'explique notamment par le fait que Montréal présente l'avantage de disposer de nombreux parcs et espaces verts, et de nombreuses installations sportives, sur l'ensemble de son territoire. Les quartiers de banlieue, résidentiels, se trouvent alors moins désavantagés qu'avec les autres destinations, dans la mesure où leurs grands espaces et leur plus faible densité de population (Canadian Census, 2021) leur permettent de profiter de telles installations.

CHAPITRE 5 ARTICLE 1 : PEDESTRIAN ACCESSIBILITY IN MONTREAL: THE DETERMINING FACTORS AND THE LEVEL OF SOCIAL EQUITY

Julien Verdier, MA

Department of Civil, Geological and Mining Engineering
Polytechnique Montréal, Montreal, Canada (Québec), H3T 1J4
Email: julien.verdier@polymtl.ca

E. O. D. Waygood

Professor
Department of Civil, Geological and Mining Engineering
Polytechnique Montréal, Montreal, Canada (Québec), H3T 1J4
Email: owen.waygood@polymtl.ca

Geneviève Boisjoly

Associate Professor
Department of Civil, Geological and Mining Engineering
Polytechnique Montréal, Montreal, Canada (Québec), H3T 1J4
Email: gboisjoly@polymtl.ca

Submitted August 1, 2023

Submitted for presentation and publication to the *Transportation Research Board*

The main author of this article, who is also the author of this memoir, contributed to the methodological approach, data collection and processing, data analysis, analysis and interpretation of the results, bibliographic research and writing of the article.

5.1 Abstract

In the context of climate change and improving quality of living in cities, local accessibility is an increasingly studied topic. From a city planning perspective, it is first important to understand the diversity of what is accessible locally and where within the city this is lacking. Further, when examining local accessibility, it is essential to examine equity to ensure that low-income households are not shut out of such neighborhoods. As such, the objectives of this paper are: 1) identify different accessibility levels; 2) determine how it relates urban form and socio-economic characteristics; 3) examine how equitable local accessibility is. Pedestrian accessibility to six key destination types in Montreal, Canada is calculated at the dissemination block level to inform clusters. Multinomial logistic regression models are conducted to evaluate the relationship of different explanatory variables on cluster membership. Horizontal and vertical measures of equity are then examined. Four accessibility categories were chosen representing core areas, mixed-use residential areas, residential areas with leisure access, and low-mix areas. Five built environment and five socio-demographic measures are shown to be statistically different between the clusters with high education identified as a key interaction variable. Sports/recreation and education are distributed most equally, while culture and local commercial destinations the least. For vertical equity, low- and middle-income households tend to enjoy a greater pedestrian accessibility than wealthier households. Within each group, the lowest income households had the lowest inequity.

Keywords: accessibility, equity, pedestrian, social environment, built environment, 15-minute city

5.2 Introduction

Active modes of transport represent an important issue in the context of the ecological transition in the transport sector. The city of short distances (e.g., the “15-minute” city) is intrinsically connected to pedestrian accessibility. In the case of Montreal, Canada it is necessary to propose a methodological framework for characterising the pedestrian accessibility, to know what built environment likely support it, and to understand how socio-demographics are linked to it in order to consider social justice.

For several years now, environmental issues have been at the heart of political debates. The transport sector is particularly a problem. Quebec, Canada enjoys low-carbon electricity and transport is a key sector to improve as it accounted for 43.3% of Quebec’s greenhouse gas emissions in 2019 (MELCCC, 2021a). Low-impact choices such as public transport and active transport are also proposed as means to improve health and quality of life (Nieuwenhuijsen et al., 2019). However, North America has been built around the car for nearly 100 years and as such, promoting active modes represents a real change in the way urban space is organised.

Sustainable mobility is not just low-pollution mobility, but also mobility that is socially viable. Building the city around walking is one way of encouraging a modal shift away from the car, but development of such areas should also consider all parts of the population to be equitable. This dual objective involves two concepts: pedestrian accessibility, and social equity.

On the one hand, pedestrian accessibility is defined as the ease with which a destination can be reached by walking (El-Geneidy & Levinson, 2011). As early as the 1960s, Jane Jacobs, in her book *The Death and Life of Great American Cities* (Jacobs, 1961b), wrote about the need to design dense, diversified urban spaces in order to promote pedestrian activity and support liveable neighborhoods. Since then, several studies have examined the issue of pedestrian accessibility, and more specifically its determinants and consequences. In particular, the literature reveals that the built environment plays a fundamental role in the choice of walking as a mode of transport (Cervero et al., 2009; Cervero & Radisch, 1996; Hong et al., 2014), as does the social environment (Y. Lu et al., 2017; Zhou et al., 2019).

On the other hand, guaranteeing socially equitable accessibility is essential, and requires characterisation of the most vulnerable according to socio-economic characteristics (Mohri et al.,

2021; Tahmasbi et al., 2019), in order to detect any disparity in the distribution of accessibility within the population based on social status.

The aim of this study is to identify the factors that influence pedestrian accessibility in Montreal, and to assess the level of equity in the distribution of accessibility within the population. The contributions of this article are therefore: (1) it tackles the issue of pedestrian accessibility using open data in the City of Montreal; (2) it determines how built environment and socio-demographic variables differ by levels of accessibility; (3) it examines both horizontal and vertical equity including a more detailed examination by income terciles (low, middle, high). As such, it helps cities know what factors likely support accessibility and how whether equity is threatened.

5.3 Background literature

The literature review focuses on two specific notions: accessibility measures and equity. The aim is to provide an overview of the different methods used to calculate accessibility, and to explain the implications of equity within an accessibility framework.

5.3.1 Accessibility measures

The different accessibility indicators that exist in the literature can be classified into four categories according to Geurs and van Wee (2004): infrastructure-based, location-based, person-based, and utility-based measures.

First, infrastructure-based accessibility involves measuring the level of performance of transport infrastructure, e.g., through congestion, network speed, or travel times; it is straight-forward to interpret (Geurs & van Wee, 2004). As we are considering pedestrians, this could be related to the pedestrian network and wait-times.

For location-based, the spatial distribution of activities must be considered. According to Geurs and van Wee (2004), two methods are possible: distance-based measures or gravity-based measures. In the first case, it is either a matter of characterising the connectivity between two points (e.g., Euclidean distance) or of counting the number of opportunities available below a certain threshold (of distance or time) in the case where more than two destinations are envisaged (cumulative opportunities method). The cumulative opportunities measure is widely used in the literature e.g., (Bertolini et al., 2005)) because it has two major benefits: it is relatively simple to compute (insofar as little data is required), and the results are easy to interpret for researchers and

policy makers, and easy communicate to the public (Geurs & van Wee, 2004). In the second case, as outlined by Hansen (1959), gravity-based measures calculate the accessibility of an area incorporating a mitigating effect of distance from the origin.

Person-based measures focus more on people's perceptions, through different spatial and temporal constraints. They provide a social assessment of accessibility, and take into consideration transport, land-use, temporal, and individual components, but are difficult to operationalise and interpret (Geurs & van Wee, 2004).

Finally, utility-based measures of accessibility aim to model the benefits that people derive from access to certain places. The aim is to estimate the maximum utility perceived by a user, from a range of choices. This complex measure makes it possible to describe both the economic and social aspects of accessibility, while considering the point of view of individuals (Geurs & van Wee, 2004).

5.3.2 Equity in transport

5.3.2.1 General definitions

In the literature, the definition of equity in transport is generally divided into two notions: horizontal and vertical equity (Delbosc & Currie, 2011; El-Geneidy et al., 2016). When considering any resource, horizontal equity refers to the notion of equality, that each individual would have the same. Vertical equity, on the other hand, includes a dimension of social justice where the resource is distributed based on the needs of each individual, in order to compensate for social inequalities (Delbosc & Currie, 2011). The later proposes that more vulnerable populations should receive a greater share of the resources. Vulnerability may be related to socio-economic characteristics, mobility needs, or particular physical abilities (Mohri et al., 2021).

5.3.2.2 Horizontal equity measurement

Horizontal equity has been measured using the Gini index (e.g., (Cascetta et al., 2020; Welch & Mishra, 2013)). This index shows the proportion of the population who has a certain share of resource. An equally distributed resource would result in a straight line; the larger the convex nature of the line, the less equally distributed the resource.

5.3.2.3 Vertical equity measurement

A common method of calculating vertical equity is to segment the population based on certain criteria to isolate the most disadvantaged, and then to measure the distribution of the good or service in question within the population of each group.

In the context of accessibility, disparities can be examined by calculating the average accessibility within the different social classes such as income (Tahmasbi et al., 2019). An equitable situation would grant better accessibility to the households with the lowest incomes. The authors also present a second method: the horizontal equity (Gini coefficient) is calculated for each income category, making it possible to assess whether the distribution of accessibility is equitable within the most vulnerable population.

5.4 Case study

This study focuses on the City of Montreal, excluding the municipalities of the Island of Montreal (see Figure 5.1) due to data availability and consistency. The territory had a population of about two million in 2021 (Ville de Montréal, 2021b).

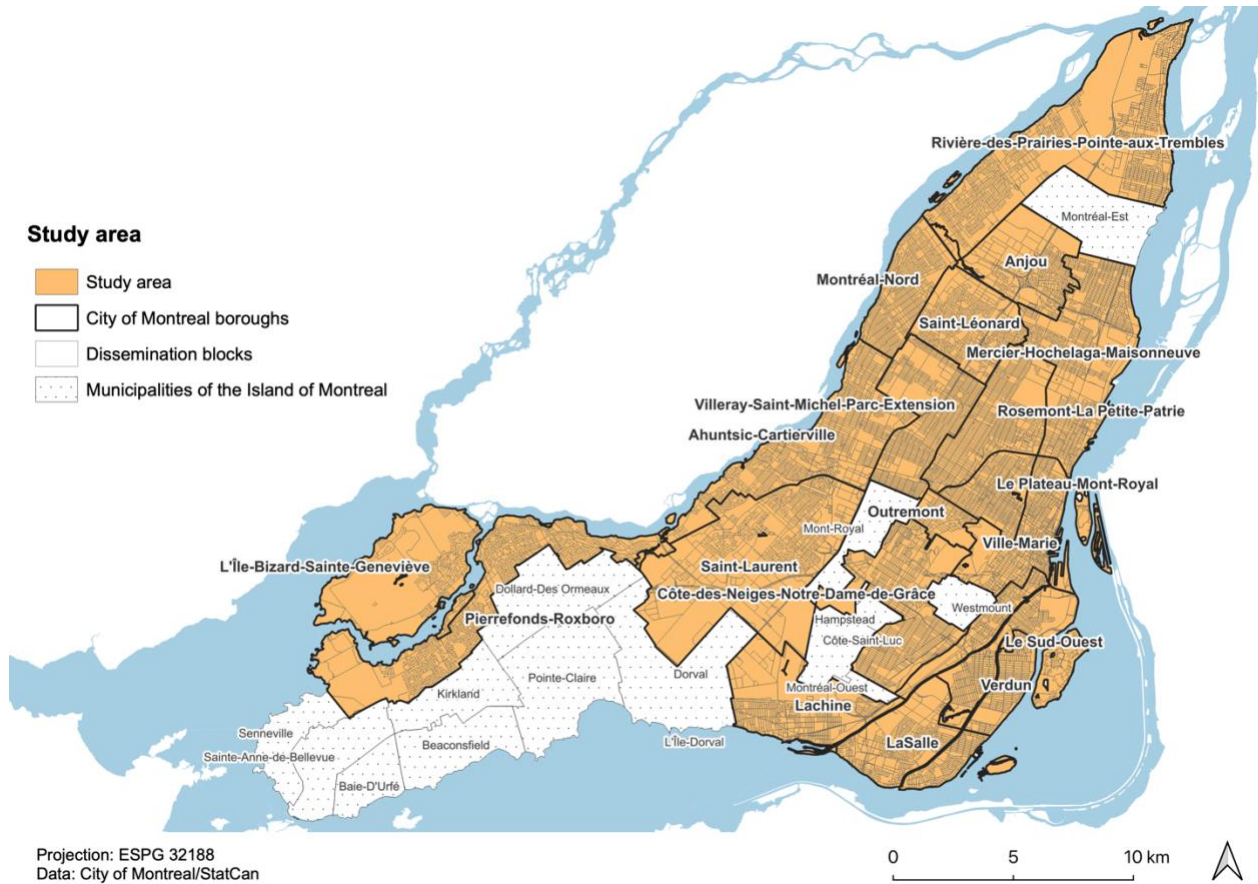


Figure 5.1 Map of the study area

5.5 Methods

5.5.1 Data collection

The study used open data of the City of Montreal (2017, 2021a, 2022b, 2022c, 2022d) and Quebec Data (2022a, 2022b). Public markets and day-care centres are from the Montreal Public Markets site (2022) and Desktop Mapping Technologies Inc. (DMTI, 2020) respectively. Demographic data come from the Canadian census (2021).

The entire analysis is conducted at the dissemination block level (see Figure 5.1). Nevertheless, the dissemination area is the smallest scale proposed by the Canadian census. In this case, the method chosen consists of assigning to each block the characteristics of the relevant dissemination areas. Thus, information on accessibility does not need to be aggregated at the dissemination area level. In the case of the land use mix and the intersection density indicators, the census tract level is used.

Each dissemination block included in the census tract is assigned the characteristics of the census tract.

5.5.2 Typology of destinations

The destinations are grouped into categories (Table 5.1). The typology is based on a list of public services provided by the City of Montreal who are partners in the project.

Table 5.1 Typology of destinations

Destination	Description	Data source
Culture	Libraries	Municipal cultural sites in Montreal (Ville de Montréal, 2017)
	Cultural activities (houses of culture, theatres, cultural centres, museums)	Municipal cultural sites in Montreal (Ville de Montréal, 2017) Commercial premises and occupancy status (Ville de Montréal, 2021a)
Education	Day-care and early childhood centres	(DMTI, 2020)
	Kindergarten services (4 years old)	Location of educational institutions in the Quebec school network (Données Québec, 2022b)
	Primary schools	Location of educational institutions in the Quebec school network (Données Québec, 2022b)
	Secondary schools	Location of educational institutions in the Quebec school network (Données Québec, 2022b)
	Postsecondary schools	Location of educational institutions in the Quebec school network (Données Québec, 2022b)
Health and social services	Health equipment and social services	M02 map files of facilities and establishments (Données Québec, 2022a)
	Pharmacies	Commercial premises and occupancy status (Ville de Montréal, 2021a)
Commercial zones	Commercial zones	Commercial premises and occupancy status (Ville de Montréal, 2021a)
Food stores	Food stores	Montreal Public Markets (Marchés publics de Montréal, 2022)
		Food facilities (Ville de Montréal, 2022b)

Table 5.1 Typology of destinations (continued)

Destination	Description	Data source
Sports and recreational activities	Neighbourhood parks	Large parks, district parks and public spaces (Ville de Montréal, 2022c)
	Major parks	Large parks, district parks and public spaces (Ville de Montréal, 2022c)
	Playgrounds	Large parks, district parks and public spaces (Ville de Montréal, 2022c)
	Indoor sports activities	Outdoor recreational, sports and cultural facilities (Ville de Montréal, 2022d)
	Activities – Nature	Raw data from the Sports and Parks Department (Ville de Montréal, 2022a)
	Outdoor water activities	Outdoor recreational, sports and cultural facilities (Ville de Montréal, 2022d)
	Outdoor winter activities	Outdoor recreational, sports and cultural facilities (Ville de Montréal, 2022d)
	Outdoor summer activities	Outdoor recreational, sports and cultural facilities (Ville de Montréal, 2022d)

5.5.3 Accessibility measure

In this article, accessibility is calculated according to a location-based measure: the cumulative opportunities method. The calculation is based on equation (2.3), with an indicator function as impedance function, defined as follows in equation (5.1) (Vale et al., 2015):

$$f(C_{ij}) = \begin{cases} 1, & C_{ij} \leq x \\ 0, & C_{ij} > x \end{cases} \quad (5.1)$$

where C_{ij} is the travel cost between areas i and j and x represents a threshold (of distance or time) beyond which accessibility is considered zero. Following previous research (Gaxiola-Beltrán et al., 2021; Logan et al., 2022), a threshold of 15 minutes is used to calculate the pedestrian accessibility to the six destinations listed above (see Table 5.1).

Rapid Realistic Routing with R5 in R (r5r) (a package available on the R software) is used to consider the network. The travel time from each dissemination block to all the other blocks is calculated based on the *OpenStreetMap* (openstreetmap.org) network. The centroid of each block is assigned to the nearest road within a radius of 300 metres (this is increased up to 1.6 km if no road is available within 300 metres). The next step is to associate each dissemination block with the destinations it contains. Then all centroids of the blocks that are less than 15 minutes' walk

away summed. For parks (polygons), different access points are determined and accessibility is calculated in relation to the nearest access point.

The objective is to characterise the distribution of accessibility within the population. This is accomplished by considering the population of Montreal households on the one hand and the average number of accessible destinations on the other. As the population data is only available at the dissemination area level (Canadian Census, 2021), it is necessary to aggregate the accessibility levels (which were calculated at the dissemination block level (a smaller spatial unit) at the dissemination area level. A dissemination area has at least one dissemination block and can contain multiple. It depends on the density of the region concerned: in a high-density zone, blocks and areas have similar dimensions, whereas in a low-density region, a dissemination area will tend to contain several blocks (Figure 5.2). This method makes it possible to avoid associating the same population with each block in the same dissemination area, as this assumption cannot be confirmed. In this case, accessibility at the level of each dissemination area is described as the average number of destinations accessible from the area.

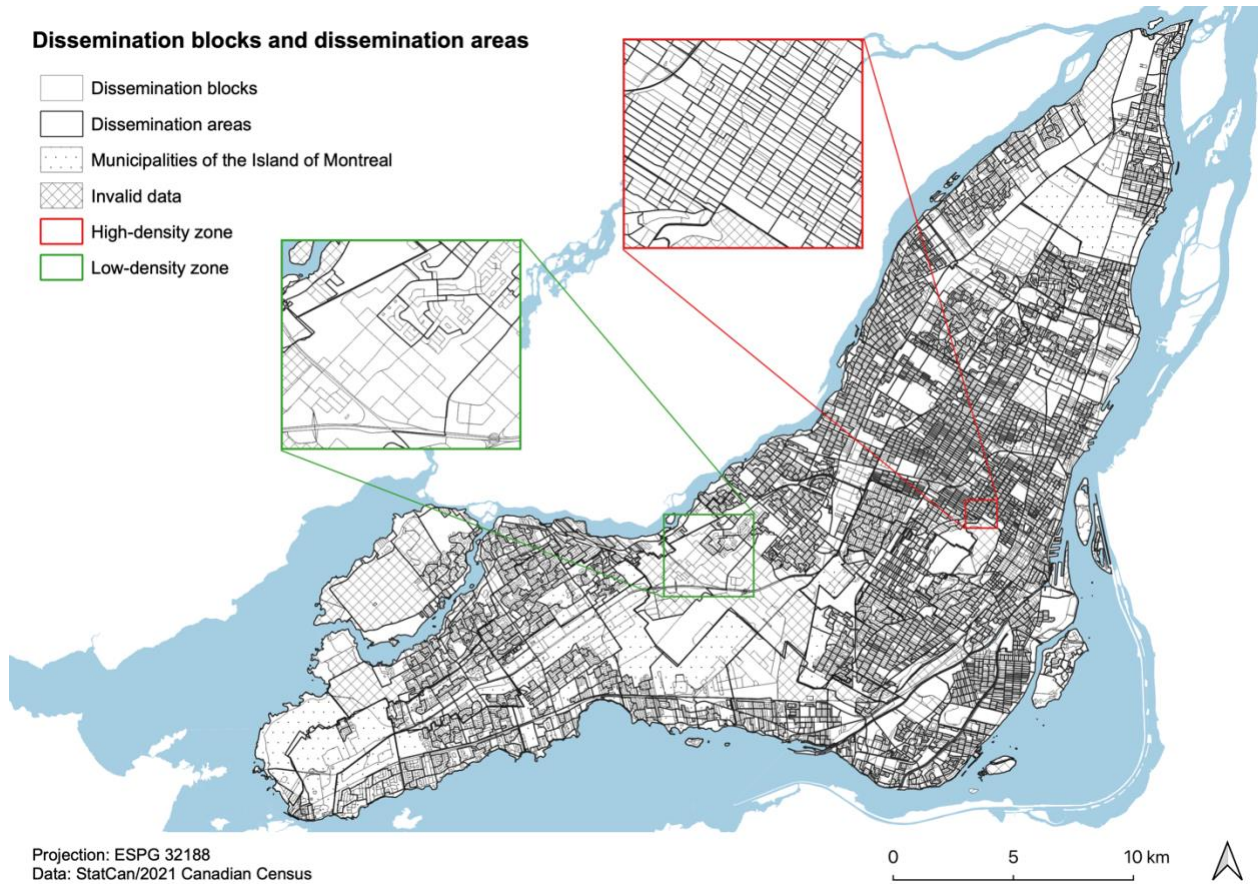


Figure 5.2 Relation between dissemination blocks and dissemination areas

5.5.4 Cluster analysis

Cluster analysis used to identify different types of neighborhoods according to their accessibility. Following previous research (N. Chen & Akar, 2017; Rahimi, 2022), k-means clustering is used. Clusters are generated from the accessibility scores obtained at the level of each diffusion block, for each of the six destinations (Table 5.1); the aim is to produce a typology of neighbourhoods according to the level of pedestrian accessibility. One technique to determine the number of clusters is to use the “elbow method”. In this method a break in the curve is called an elbow. In our data it appears for four clusters at the level of the explained inertia share.

5.5.5 Multinomial Logit Model

Multinomial logit regression model was used to examine the relationships between built environment and socio-demographics (Table 5.2) with the clusters. These variables are inspired by

those used in many articles that attempt to explain accessibility and mode choice, through social and built environments (N. Chen & Akar, 2017; Hong et al., 2014; Y. Lu et al., 2017; Zhou et al., 2019).

Table 5.2 Summary statistics

Statistic	Description	N	Mean	St. Dev	Data source
Built environment					
Population density	Number of persons per hectare (at the dissemination area level)	10,835	81.781	65.649	(Canadian Census, 2021)
Land use mix	Interaction index (z-score) (at the census tract level)	10,835	0.000	1.000	(Ville de Montréal, 2023c)
Intersection density	Number of street intersections per hectare (at the census tract level)	10,835	6.706	3.117	(Ville de Montréal, 2023b)
Proportion of old buildings	Proportion of buildings built in 1960 or earlier (at the dissemination area level)	10,835	0.366	0.262	(Canadian Census, 2021)
Proportion of single-detached houses	Proportion of single-detached houses (at the dissemination area level)	10,835	0.145	0.256	(Canadian Census, 2021)
Social environment					
Proportion of elderly	Proportion of persons aged 65 and above (at the dissemination area level)	10,835	0.169	0.093	(Canadian Census, 2021)
Household income	Average total household income in 2020 (\$10,000 CAD) (at the dissemination area level)	10,835	9.634	5.678	(Canadian Census, 2021)
Immigration from Europe	Proportion of immigrants from Europe in the population (at the dissemination area level)	10,835	0.079	0.049	(Canadian Census, 2021)
Immigration from outside Europe	Proportion of immigrants from outside Europe in the population (at the dissemination area level)	10,835	0.233	0.129	(Canadian Census, 2021)
Proportion of the most educated	Proportion of persons with a <i>baccalauréat</i> 's degree or higher, among those aged 25-64 (at the dissemination area level)	10,835	0.434	0.187	(Canadian Census, 2021)

5.5.5.1 Description of the interaction method for land use mix

To measure land-use mixing entropy or the Herfindahl-Hirschman index are commonly applied. These measures consider the percentage of an area devoted to pre-determined land-use categories. If there were three categories and the area was evenly represented by those three, then the land-use

mix would be 1. These two methodologies were tested and produced similar results (Figure 5.3). However, due to the methodology, the results suggested that some peripheral areas were more mixed than the highly mixed and diverse central areas. As such, a third approach was tested.

Manaugh and Kreider (2013) explain that the two measures of land use mix applied above mask some of the information that distinguishes land-use types. Indeed, two areas with the same proportions of uses will be given the same mix score. However, these areas can be organised in two completely different ways. For example, a half-and-half versus checker-board layout would result in the same score (if only two uses were present).

To overcome this bias, the land use mix can be computed using the interaction method developed by Manaugh and Kreider (2013). The first step is to convert the polygons of the land valuation units into lines. Next, all the interaction lines, i.e., the lines separating two distinct uses, must be isolated, and then summed over each census tract. Finally, this sum is divided by the surface area of the census tract, and the values are standardised using the z-score. With this method, the closer the different uses are to each other, the higher the mix.

Based on previous research on land-use (Chang & Liao, 2011; Gong et al., 2020; Mavoa et al., 2018; Wo, 2019) and data on land units (Ville de Montréal, 2023c), six land uses are considered in this study: residential, commercial, industrial, transportation, public services, and vacant land. In this case, fifteen different interactions are possible: residential/commercial, residential/industrial, residential/transportation, residential/public services, residential/vacant, commercial/industrial, commercial/transportation, commercial/public services, commercial/vacant, industrial/transportation, industrial/public services, industrial/vacant, transportation/public services, transportation/vacant and public services/vacant.

On Montreal Island, the central-East areas are generally where the most walking trips occur, and many destinations exist to support such travel. Conversely, neighbourhoods further out to the North, West and South of the downtown are areas where the diversity of land uses is lower from a perspective of walkability. Entropy and Herfindahl-Hirschman index do not allow us to observe this reality. The interaction method, on the other hand, seems to be much more faithful to the pedestrian experience.

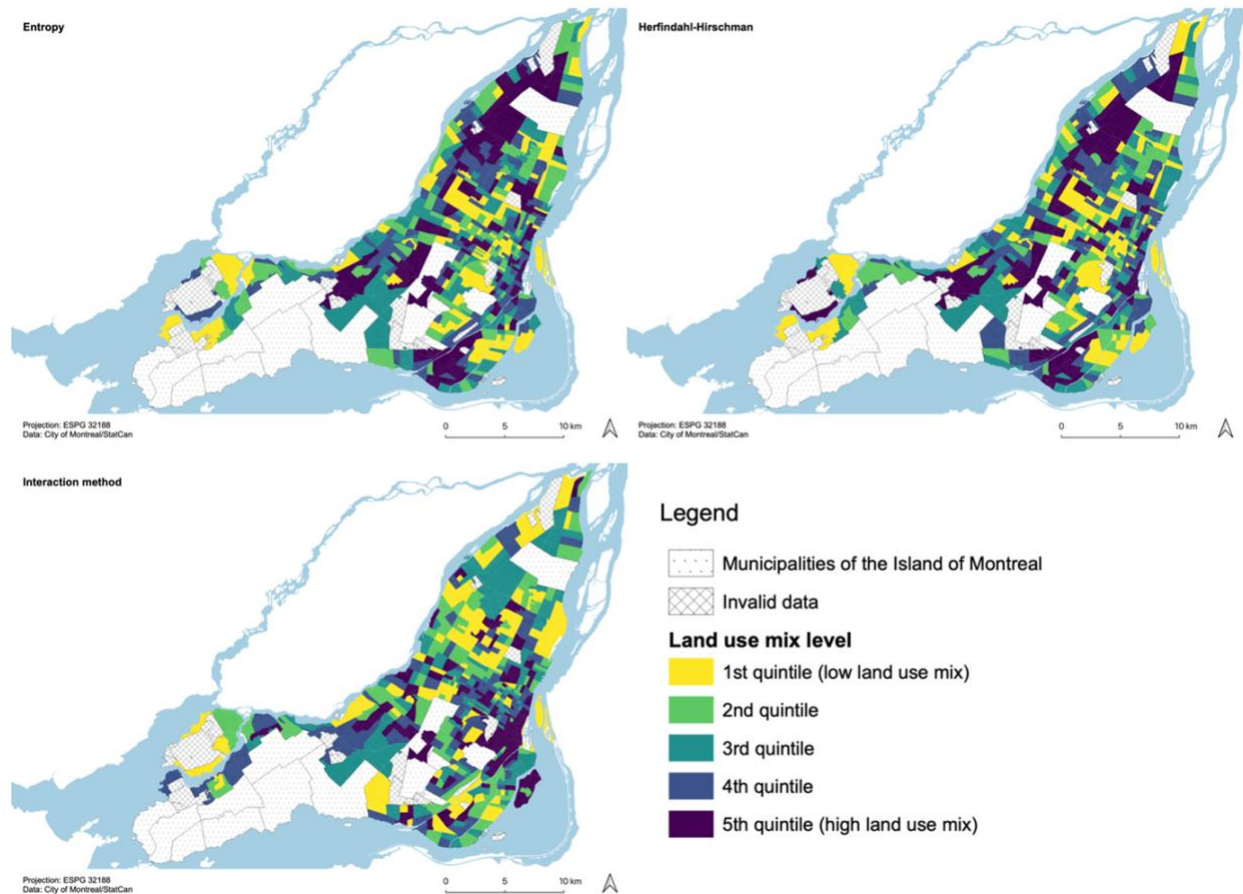


Figure 5.3 Land use mix maps for entropy (top left), Herfindahl-Hirschman index (top right) and the interaction method (bottom left)

5.5.6 Equity assessment

Both horizontal and vertical equity are considered here. In both cases, Lorenz curves and Gini coefficients are used. Lorenz curves are drawn for each of the six destination types, representing the cumulative proportion of accessibility (in terms of the number of destinations accessible) as a function of the cumulative proportion of the population. The Gini index is then calculated to quantify the level of horizontal equity and thus detect any potential unequal distribution of accessibility across Montreal.

In terms of vertical equity, the first step is to classify the population by income: low-income, middle-income, and high-income households. More precisely, the percentiles associated with the distribution of average household income at the level of dissemination areas are calculated: the first

40% constitute low-income households (i.e., dissemination areas representing low-income households), households between the 40th and 80th percentiles are designated as middle-income, and the last 20% are high-income households (Tahmasbi et al., 2019).

Following Tahmasbi et al. (2019), two measures are used to consider vertical equity: the calculation of average accessibility, and the calculation of horizontal equity (Gini coefficient), within each category of household. The first measure includes an analysis of the variances in accessibility to destinations between different categories of households (Welch's ANOVA and Tukey test) to evaluate the statistical influence of household typology on the level of accessibility and compare the most vulnerable households (low-income) with the others. The second measure provides information on the equity or inequity of the distribution of accessibility within each income group.

5.6 Results

5.6.1 Clusters

A four clusters solution was retained, and the spatial distribution is shown in Figure 5.4. The z-scores for each of the six categories by cluster can be seen in Figure 5.5. Cluster 1 was named *Highly mixed neighbourhoods*. This cluster has the best accessibility to all the considered destinations; a much larger difference can be observed for commercial and food destinations as compared with the other clusters. The next cluster, term *Urban villages*, has the next highest accessibility for all categories. The final two clusters have much lower accessibility, but a clear distinction occurs for leisure and sports destinations. As such, these two final clusters are labelled *Residential neighbourhoods with leisure services* and simply *Low-mix neighbourhoods*.

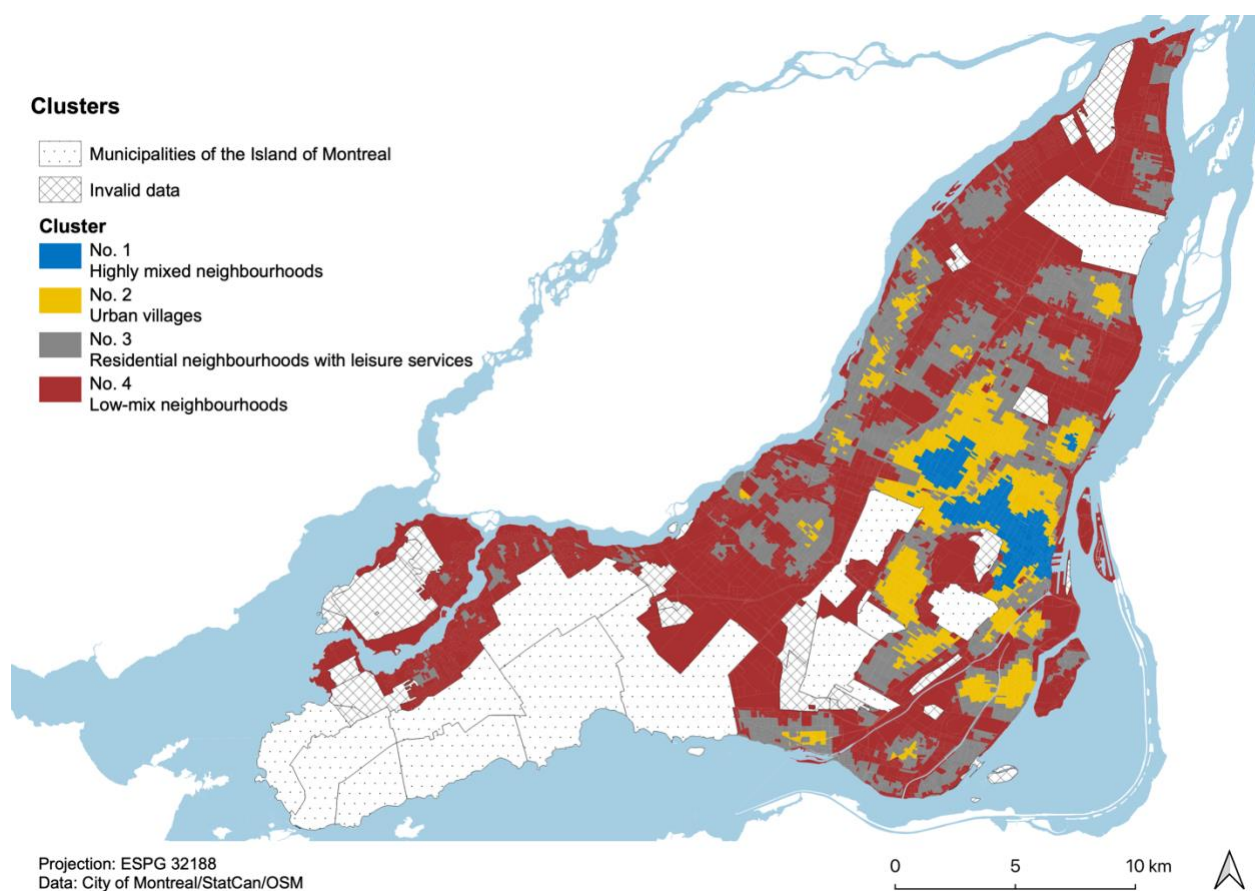


Figure 5.4 Geographical distribution of the clusters

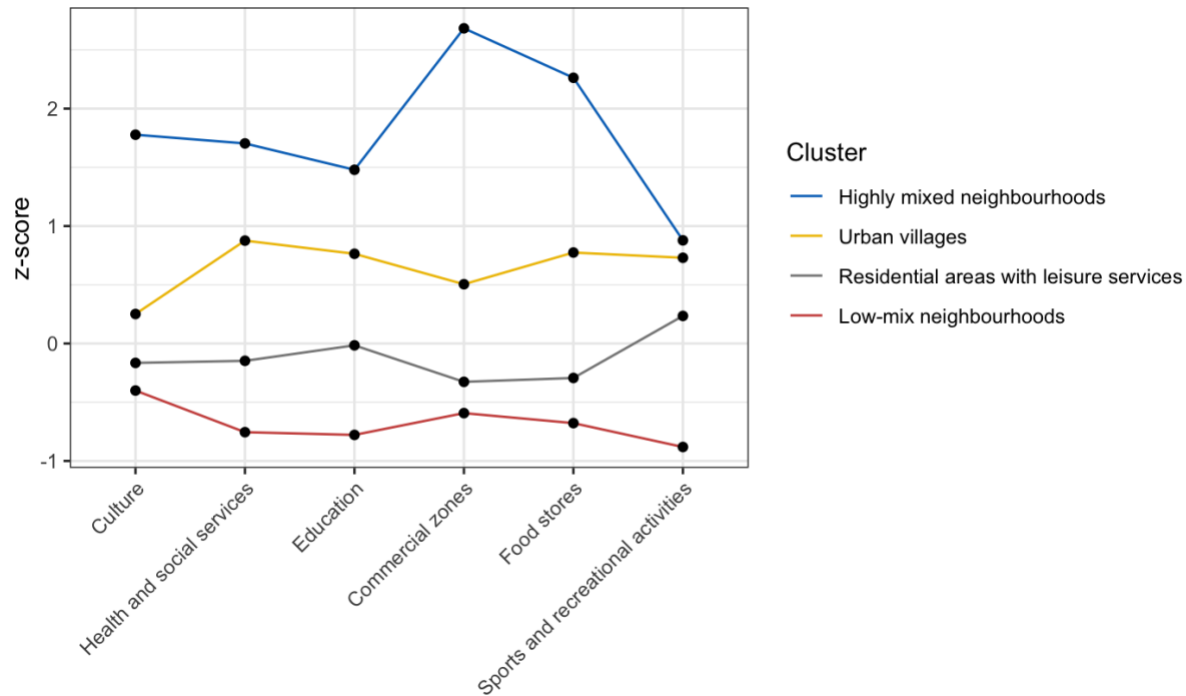


Figure 5.5 Z-score of accessibility indicators by cluster

5.6.2 Built and social environment characteristics of the clusters

The mean value of the social and built environment variables used in this study are shown in Table 5.3. A few trends can be observed. In terms of urban form and use, as accessibility decreases, the land use mix and the density of intersections decrease along with the proportion of older buildings (except for cluster 2), while the proportion of single-detached houses increases considerably. When it comes to socio-economic variables, as accessibility decreases, the average population density also decreases, the proportion of elderly people rises, the average household income remains relatively stable across clusters 1 through 3, although it is higher in cluster 4. Finally, immigration from Europe tends to drop, while immigration from outside Europe grows, and the average level of education falls.

Table 5.3 Built and social environments of the four clusters (means)

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
	Highly mixed neighbourhoods	Urban villages	Residential neighbourhoods with leisure services	Low-mix neighbourhoods
Number of observations	927	2,157	4,098	3,653
Built environment				
Population density (persons/ha)	129.8	116.7	83.4	47.2
Land use mix (z-score)	0.577	-0.010	-0.029	-0.108
Intersection density (intersections/ha)	10.7	7.9	6.8	4.9
Proportion of old buildings (%)	46.3%	50.6%	38.0%	24.3%
Proportion of single-detached houses (%)	0.2%	2.3%	13.0%	26.9%
Social environment				
Proportion of elderly (%)	12.8%	13.9%	17.6%	18.9%
Household income (\$10,000 CAD)	9.39	8.40	9.23	10.87
Immigration from Europe (%)	9.6%	7.9%	7.6%	7.8%
Immigration from outside Europe (%)	15.6%	19.1%	24.7%	26.1%
Proportion of the most educated (%)	65.3%	48.9%	39.6%	38.9%

5.6.3 Multinomial Logistic regression analysis

The results of the MNL analysis on the cluster categories are presented in Table 5.4. *Highly mixed neighbourhoods* are used as the reference variable. Three models are presented: one with only built environment measures; one with only socio-demographic measures, and one with both. In separate analysis (not presented here), each socio-demographic measure was added individual to examine interactions with the built environment measures.

Table 5.4 Results of the multinomial logistic (MNL) regressions modelling the influence of each explanatory variable on the likelihood to belong to the different clusters

	Model 1			Model 2			Model 3		
	β coeff.	Std. Error	p	β coeff.	Std. Error	p	β coeff.	Std. Error	p
Intercept (Ref: Highly mixed neighbourhoods)									
Urban villages	2.940	0.197	***	5.022	0.253	***	6.642	0.375	***
Residential neighbourhoods with leisure services	6.349	0.208	***	4.251	0.248	***	9.668	0.393	***
Low-mix neighbourhoods	8.761	0.219	***	3.150	0.253	***	11.722	0.407	***
BUILT ENVIRONMENT									
Population density									
Urban villages	[-0.001]	0.001		-	-	-	-0.001	0.001	*
Residential neighbourhoods with leisure services	-0.006	0.001	***	-	-	-	-0.006	0.001	***
Low-mix neighbourhoods	-0.016	0.001	***	-	-	-	-0.017	0.001	***
Land use mix									
Urban villages	-0.118	0.030	***	-	-	-	-0.069	0.032	**
Residential neighbourhoods with leisure services	-0.125	0.027	***	-	-	-	[0.012]	0.025	
Low-mix neighbourhoods	-0.374	0.117	***	-	-	-	[-0.144]	0.105	
Intersection density									
Urban villages	-0.219	0.013	***	-	-	-	-0.171	0.014	***
Residential neighbourhoods with leisure services	-0.388	0.015	***	-	-	-	-0.307	0.016	***
Low-mix neighbourhoods	-0.628	0.018	***	-	-	-	-0.558	0.019	***
Proportion of buildings built before 1960									
Urban villages	-0.506	0.190	***	-	-	-	[-0.338]	0.241	
Residential neighbourhoods with leisure services	-3.898	0.199	***	-	-	-	-3.009	0.252	***
Low-mix neighbourhoods	-6.035	0.217	***	-	-	-	-4.998	0.268	***
Proportion of single-detached houses									
Urban villages	45.828	4.905	***	-	-	-	43.660	5.324	***
Residential neighbourhoods with leisure services	54.218	4.908	***	-	-	-	50.082	5.327	***
Low-mix neighbourhoods	55.371	4.909	***	-	-	-	51.295	5.328	***

Table 5.4 Results of the multinomial logistic (MNL) regressions modelling the influence of each explanatory variable on the likelihood to belong to the different clusters (continued)

	Model 1			Model 2			Model 3		
	β coeff.	Std. Error	p	β coeff.	Std. Error	p	β coeff.	Std. Error	p
SOCIAL ENVIRONMENT									
Proportion of elderly									
Urban villages	-	-	-	[-0.399]	0.554		-2.488	0.587	***
Residential neighbourhoods with leisure services	-	-	-	4.109	0.525	***	-0.984	0.579	*
Low-mix neighbourhoods	-	-	-	5.544	0.537	***	[-0.414]	0.611	
Household income									
Urban villages	-	-	-	0.046	0.016	***	[-0.011]	0.019	
Residential neighbourhoods with leisure services	-	-	-	0.267	0.015	***	0.051	0.019	***
Low-mix neighbourhoods	-	-	-	0.369	0.016	***	0.056	0.019	***
Immigration from Europe									
Urban villages	-	-	-	-2.501	0.992	**	[-0.983]	1.133	
Residential neighbourhoods with leisure services	-	-	-	-4.258	1.007	***	[-1.547]	1.205	
Low-mix neighbourhoods	-	-	-	-4.209	1.030	***	-3.681	1.271	***
Immigration from outside Europe									
Urban villages	-	-	-	2.506	0.449	***	1.780	0.577	***
Residential neighbourhoods with leisure services	-	-	-	6.125	0.449	***	3.421	0.584	***
Low-mix neighbourhoods	-	-	-	7.491	0.458	***	5.069	0.608	***
Proportion of the most educated									
Urban villages	-	-	-	-8.165	0.380	***	-6.780	0.426	***
Residential neighbourhoods with leisure services	-	-	-	-12.471	0.391	***	-9.407	0.441	***
Low-mix neighbourhoods	-	-	-	-14.082	0.402	***	-9.428	0.462	***
Observations	10,835			10,835			10,835		
McFadden R ²	0.282			0.167			0.323		
Log likelihood	-9,846.2			-11,423			-9,284.2		
Likelihood ratio test	7,741.1***			4,586.8***			8,865.0***		
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01								

[]: Not significant (p-value > 0.1)

“-”: Variable not included

5.6.3.1 The built environment (Model 1)

According to model 1, a dense environment in terms of buildings and population, with a high land-use mix, a high density of intersections and a large proportion of old buildings, is associated with greater pedestrian accessibility.

5.6.3.2 The social environment (Model 2)

According to model 2, social characteristics also have a globally significant impact on accessibility. The proportion of elderly, household income, and immigration from outside Europe tend to increase with decreasing accessibility. Immigration from Europe and the proportion of most educated tend to increase with increasing accessibility.

5.6.3.3 Both built and social environments (Model 3)

In model 3, both built and social variable are included, in order to assess how they interact. Following the separate analysis on individual characteristics, it was found that the education appears to be a key interaction factor. In particular, the influence of the land-use mix is completely transformed with the integration of the level of education. In addition, the effect of immigration from Europe becomes for the most part insignificant.

5.6.4 Equity

5.6.4.1 Horizontal equity

The Gini coefficient is calculated for all households to examine horizontal equity. First, the Lorenz curves for each destination type are shown in Figure 5.6. Here the x-axis represents the cumulative proportion of the total population, while the y-axis quantifies the cumulative proportion of accessibility (calculated according to the average number of destinations accessible from each dissemination block). The Gini coefficients are 0.728, 0.622, 0.512, 0.457, 0.381, and 0.261 for accessibility to culture, commercial zones, food stores, health and social services, education, and sports and recreational activities, respectively. This suggests that recreational activities and education are the most evenly distributed (closer to 0), whereas culture and commercial zones are the least (closer to 1).

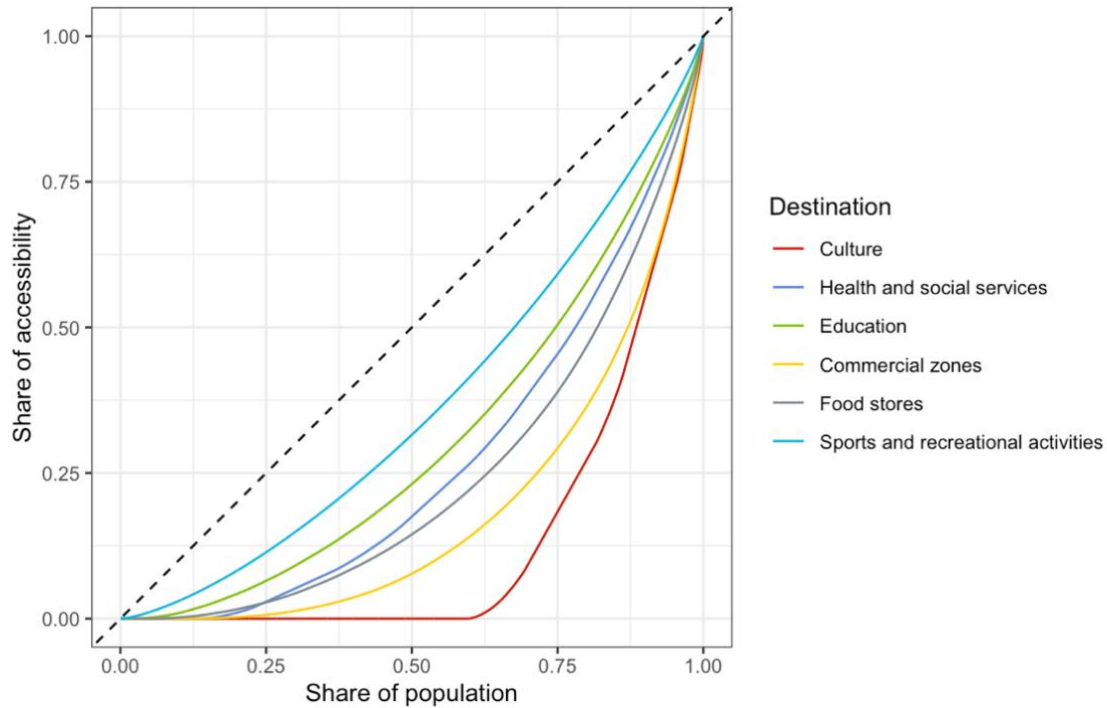


Figure 5.6 Lorenz curves for horizontal equity assessment (for each destination)

5.6.4.2 Vertical equity

Assessing vertical equity requires consideration of vulnerable populations. Here, income allows households to be segmented into three categories: low-income, middle-income, and high-income households (Figure 5.7). Homoscedasticity, i.e., the homogeneity of variances, is used to compare the means of accessibility to all destinations between household categories. The Breusch-Pagan and Bartlett tests show that the variances in accessibility to destinations are heterogeneous between household categories; however, when using the Levene's test (another homoscedasticity test), it seems like the null hypothesis (that the variances are equal) cannot be rejected, at the 95% level.

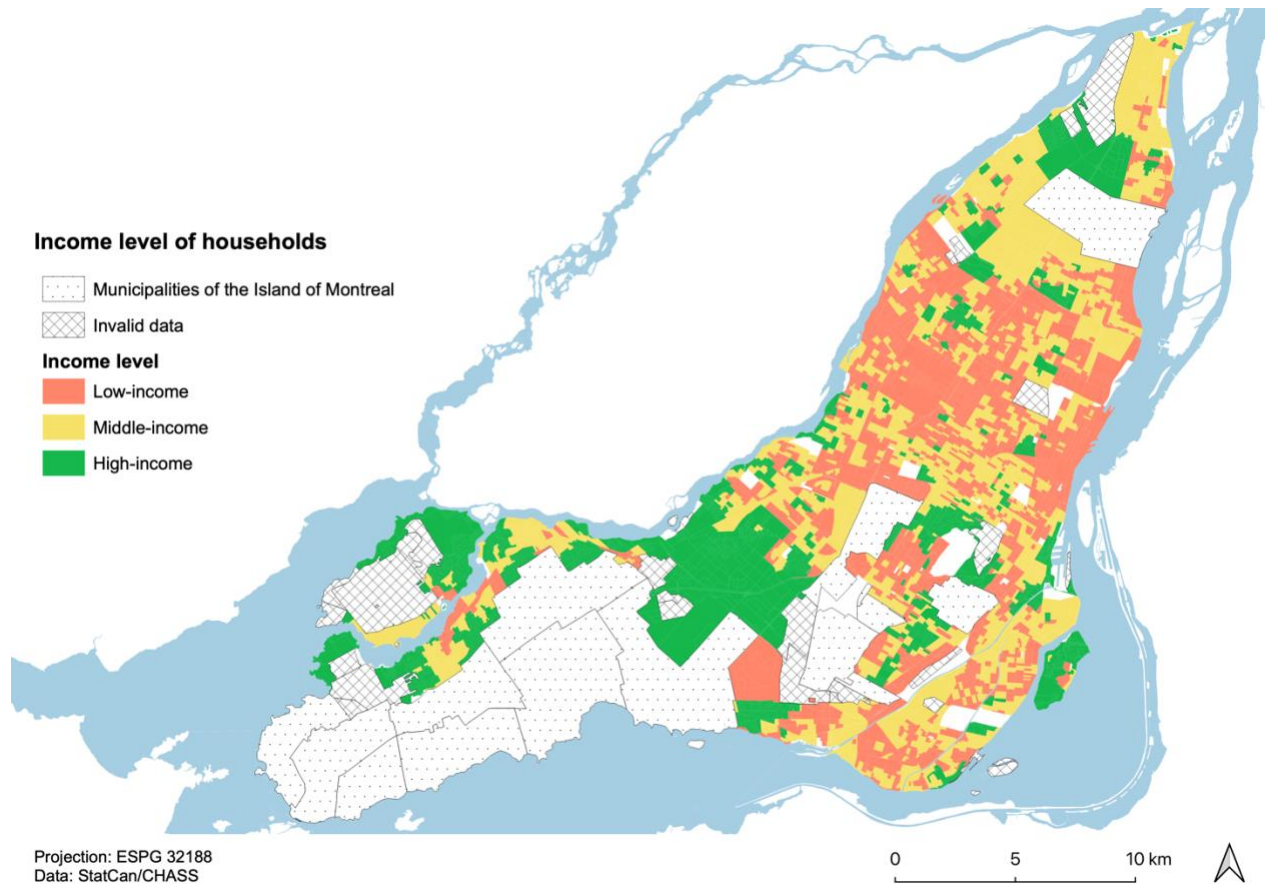


Figure 5.7 Map of the income level of households

Assuming that homoscedasticity is not verified, a Welch's ANOVA (not shown due to space constraints) is used to compare the means of accessibility between household categories. The test indicates that income level of a household has a significant impact on the accessibility enjoyed (p -value < 0.001), except for culture (p -value = 0.443). The results are visually presented in Figure 5.8. Overall, low- and middle-income households enjoy better pedestrian accessibility than wealthier households.

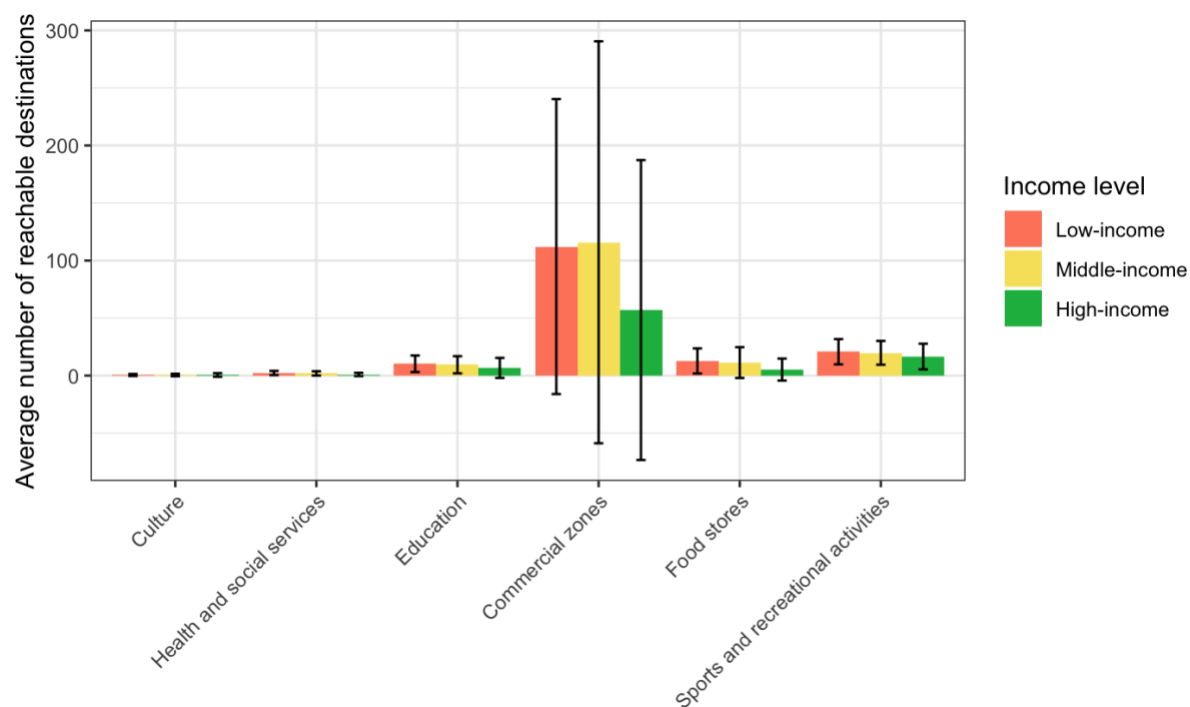


Figure 5.8 Average accessibility to destinations by income level

Beyond average accessibility, it is also useful to examine the distribution of accessibility within each income group. To do this, Lorenz curves (Figure 5.9) and Gini coefficients (Figure 5.10) are computed. Figure 5.9 shows a deterioration in the equity of the distribution of accessibility as income rises, for all destinations. In fact, the curves tend to become more and more convex as income level improves: a smaller proportion of the population benefits from a larger proportion of accessibility. Through Gini coefficients, Figure 5.10 shows how the within-group inequity is largest for the highest income group.

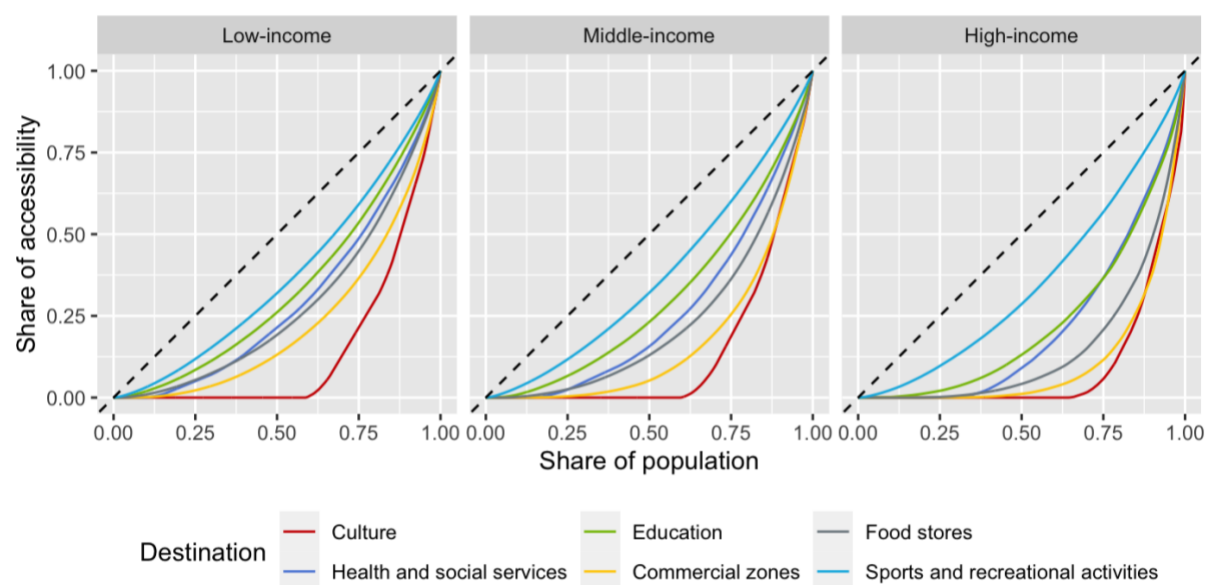


Figure 5.9 Lorenz curves for vertical equity (for each destination)

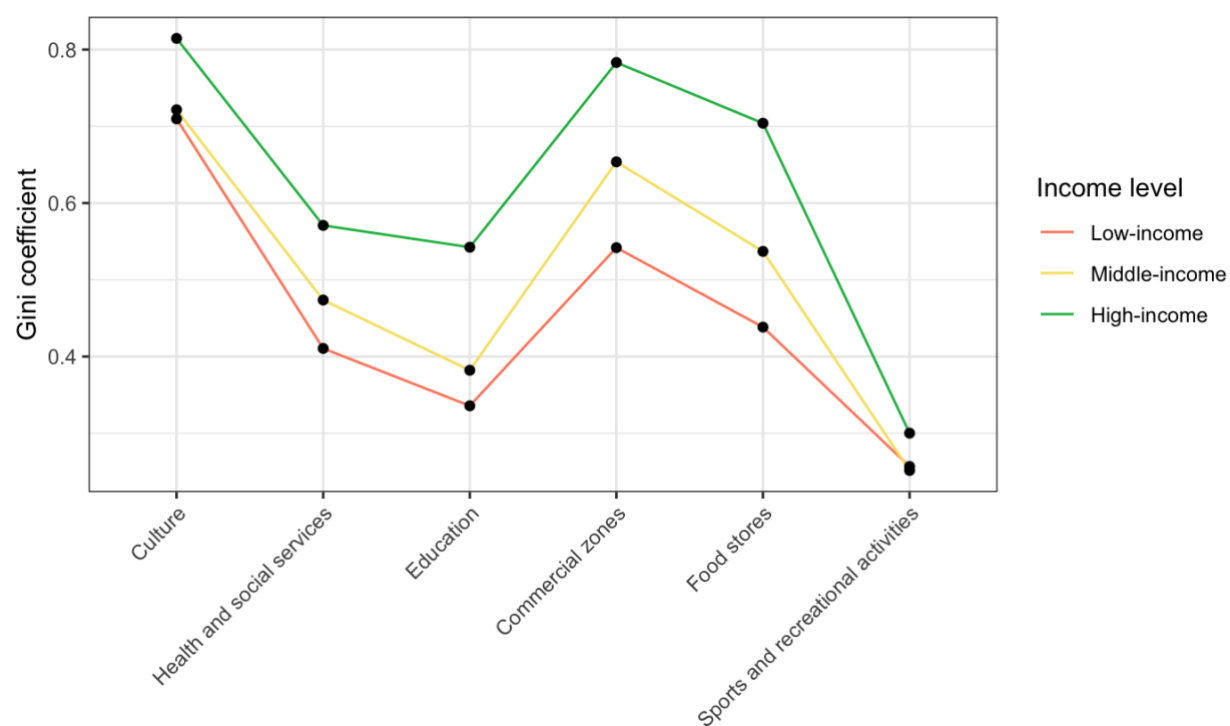


Figure 5.10 Gini coefficients for different household income levels

5.7 Discussion

The findings support the idea that the model of the concentrated and diversified city is favourable to the use of active modes, and potentially helps support low-car and car-free living as confirmed by other research in Montreal (Laviolette et al., 2021). All of findings for the built environment and the clusters support the argument put forward by Jacobs (1961b) on supporting diverse and vibrant communities. First, the higher the population density, the greater the potential demand for various services (shops, schools, etc.) and the greater the capacity to support them. Then, a higher density of intersections implies better network connectivity: walking distances to destinations are therefore reduced, and walking becomes much more attractive – this relates to Jacobs’ proposal of smaller block sizes facilitating greater neighbourhood vitality (Jacobs, 1961b). The strong presence of old buildings as a factor of pedestrian accessibility could relate to a number of relationships. One is, as Jacobs argues, is that they provide a variety of rent levels, allowing for small shops to start up. It may also be linked to built environments established before streets were designed primarily for vehicle movement such as urban highway 15 in Montreal. Finally, a high density of buildings potentially implies a density and diversity of services favourable to walking (Jacobs, 1961b) – single-detached houses are mainly found in residential areas, where the density and diversity of buildings and land-use are low.

In terms of the socio-demographic characteristics, education was found to be a crucial consideration (Table 5.4). Overall, the results suggest that education is a stronger variable than most in terms of predicting what cluster a household belongs to: education explains away the influence of immigration from Europe (i.e., it does not matter that people are from Europe, it matters that they are educated); immigration from outside Europe is still less likely to be found in the most accessible area, but its influence is smaller (the coefficient size decreases). For whatever reason, it appears that higher educated people are more likely to chose neighborhoods that have higher land-use mix. It should be noted that average income remains slightly higher in the less accessible neighborhoods.

From the equity analysis, population segmentation is usually based on socio-economic characteristics, such as income (Guimarães et al., 2020; Tahmasbi et al., 2019), age (Ricciardi et al., 2015) or car ownership (Delbosc & Currie, 2011). Demography (e.g. population density, children, women), housing and hygiene (e.g. treated water, electricity, toilets), and health (e.g. weight, number of deaths) can also make it possible to characterize the most disadvantaged

(Sharma & Patil, 2021). As higher accessibility may be linked to higher housing costs (Luo et al., 2021), we focused on household income in this study.

Although pedestrian accessibility is better among low-income households, it should not be forgotten that many destinations in Montreal are difficult to reach without a car and that this mode of transport is the most expensive, thus likely limiting options. It seems that vertical equity is being partly respected, by offering the most vulnerable more destinations accessible within walking distance. This might also be a causal effect. If lower income households cannot afford high-cost transport means such as a car, then there might be a desire to locate in areas that do not need one and if individuals are walking to buy goods, there is support for those local stores. The analysis by income group suggests that there is more within-group inequity for the highest income group. What this may relate to is an ability to buy into the lifestyle one desires: those who wish for highly accessible neighborhoods can buy that option, those that wish for inconvenient locations that require car ownership also can buy that option.

Many of those mixed neighbourhoods also have large amounts of traffic that pass through them from the wealthier suburban neighbourhoods, which is an environmental injustice as the individuals less likely to use cars suffer many of the externalities of car use such as air pollution, noise pollution, and traffic danger (Nieuwenhuijsen et al., 2019). Such an affect likely lowers the value of those locations.

There are limitations to this research. Firstly, the method of calculating accessibility is based on the centroids of the dissemination blocks, whereas it would be more realistic to consider each destination itself; using a gravity-based measure could also improve the relevance of the results. In addition, the destinations could be described in a more precise and nuanced way: for example, how can we consider cultural venues where small groups of people gather? Furthermore, no weighting is given to the destinations. Finally, household income is only one component of vulnerability, which can be described by more social characteristics.

5.8 Conclusion

Following from previous research, higher pedestrian accessibility was found in central neighborhoods. The logit models showed that pedestrian accessibility is associated with dense urban space (in terms of population and buildings) offering a variety of uses, with a high density of intersections and a significant presence of old buildings. The most pertinent individual

characteristic was found to be level of education which had a strong interaction effect with land-use mix.

The analysis of horizontal equity, which is closer to the notion of equality, showed that the distribution of accessibility is particularly uneven for culture and commercial zones, unlike recreational activities and educational destinations, which are the most evenly distributed across the territory. Then, the most vulnerable households (here characterised by low income) enjoy better pedestrian accessibility than other households, particularly the wealthiest, both in terms of average accessibility and in terms of the distribution of accessibility within each category.

For future research, it would be interesting to look at regional accessibility through public transport notably. While basic needs should be met within the neighbourhood in which people live, it is inconceivable that people should be prevented from travelling further afield. We therefore need to imagine the city as a multitude of autonomous neighbourhoods, guaranteeing the best possible continuity, all served by an efficient public transport system; by combining these two elements, it would not be (felt) necessary to have a car. Lastly, this study considered different categories of population based on household income, but it would be worth considering other subgroups, such as whether families are more likely to have access or not.

5.9 Acknowledgments

This research was partially funded by Mitacs in partnership with the City of Montreal. The authors would like to thank José Arturo Jasso Chávez (McGill University), who took part in data collection and calculated the accessibility indicators on *r5r*, and Karl El-Murr (Polytechnique Montréal), who also helped with data collection. The authors also thank Philippe Apparicio, Kevin Manaugh and Pénélope Renaud-Blondeau for their valuable advice.

5.10 Author contributions

The authors confirm contribution to the paper as follows: study conception and design: J. Verdier, E. O. D. Waygood, G. Boisjoly; data collection: J. Verdier; analysis and interpretation of results: J. Verdier, E. O. D. Waygood, G. Boisjoly; draft manuscript preparation: J. Verdier, E. O. D. Waygood. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

CHAPITRE 6 DISCUSSION GÉNÉRALE

Le présent mémoire s'est tout d'abord penché sur la question de la mesure de l'accessibilité piétonne à Montréal. En effet, dans le cadre du projet mené par la Ville de Montréal, il y a une nécessité de proposer une méthodologie pour le calcul de l'accessibilité, dans l'optique de proposer un outil interactif destiné au public, sur lequel il sera possible d'observer l'accessibilité aux destinations à pied notamment.

Le premier enjeu a donc été de choisir une mesure d'accessibilité à la fois pertinente et simple à communiquer, pour les politiques et pour le public. Au vu des mesures exposées dans la revue de littérature, le choix de la *méthode des opportunités* cumulées a permis de générer de tels indicateurs pour les six types de destinations considérés. Les disparités d'accessibilité observées sur le territoire selon les destinations ont mis en exergue l'importance de s'intéresser à cette question fondamentale de l'accessibilité piétonne.

En outre, la littérature suggère diverses méthodes pour mesurer l'accessibilité et examiner les caractéristiques des environnements bâti et social qui y sont associés. Pour mieux comprendre l'accessibilité piétonne à Montréal, une approche basée sur le regroupement a été adoptée. Pour ce faire, la méthode de regroupement du *k-moyennes* a été utilisée pour générer une typologie de quartiers selon le niveau d'accessibilité. Les résultats ont permis d'observer la surreprésentation des quartiers centraux qui bénéficient d'une bonne accessibilité piétonne, à la différence des quartiers résidentiels de banlieue, ce qui pose la question de la continuité de l'accessibilité piétonne sur le territoire.

Il est également intéressant de remarquer que les niveaux d'accessibilité aux différentes destinations sont parfois corrélés entre eux. En effet, la Figure 6.1 montre que les coefficients de Spearman dénotent des corrélations plus ou moins importantes entre les niveaux d'accessibilité aux catégories de destinations. Ce constat explique notamment les similitudes observées entre les cartes d'accessibilité, par exemple entre les zones commerciales et les commerces alimentaires, dont les niveaux d'accessibilité sont corrélés à 90%. Une densité qui soutienne les commerces est nécessaire : dans les règles d'Amérique du Nord, des lois sévères de zonage imposent que tous les magasins soient sur une même rue, d'où ce lien particulièrement fort entre les commerces alimentaires et les zones commerciales. De même, la typologie de quartiers obtenue grâce aux

classes différencie les quartiers qui bénéficient d'une bonne accessibilité à globalement toutes les destinations, des autres quartiers qui profitent d'une mauvaise accessibilité piétonne en général.

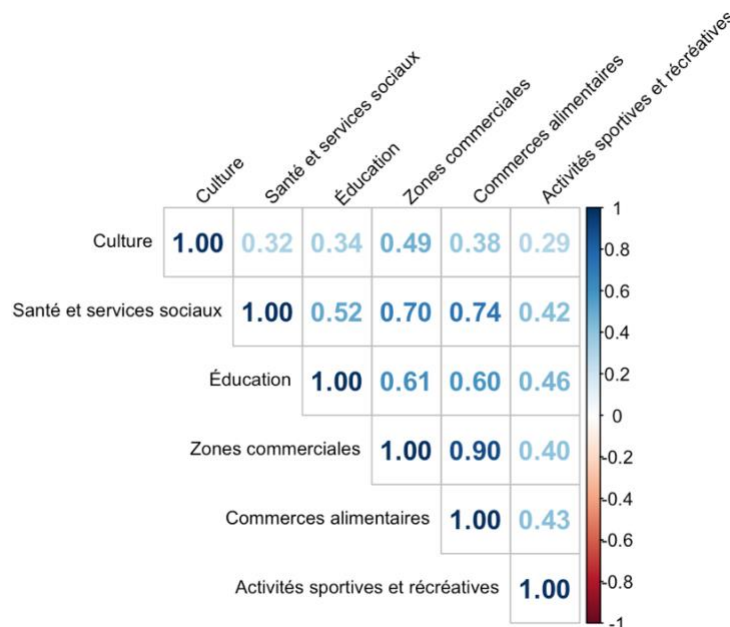


Figure 6.1 Matrice de corrélations (Spearman) des niveaux d'accessibilité piétonne aux catégories de destinations

Dans une perspective d'évaluer l'impact de différentes variables relatives à l'environnement bâti et à l'environnement social sur le niveau d'accessibilité, des modèles MNL ont été calculés. Les variables explicatives ont été choisies en s'inspirant de la littérature et en suivant les principes de la *ville des courtes distances*. Ces modèles ont abouti à des résultats cohérents avec les concepts de la ville des courtes distances ainsi que les résultats de précédentes études menées sur d'autres villes, à savoir qu'un environnement bâti dense et diversifié est à la base d'une bonne accessibilité piétonne. Il est important de rappeler que les modèles développés ici ne permettent pas de conclure quant à des liens de cause à effet ; l'étude met en avant des corrélations entre le niveau d'accessibilité piétonne et les spécificités de l'environnement bâti. De plus, l'ajout de caractéristiques socio-économiques a mis en valeur une variable en particulier, le niveau d'éducation, qui s'est trouvé fortement et positivement lié à l'accessibilité. Un niveau d'éducation plus élevé peut être lié au fait que ces personnes sont plus ouvertes à la nouveauté, ou possèdent des fondements moraux qui soutiennent davantage les commerces indépendants : l'éducation n'en est pas nécessairement la cause, mais permet d'établir une approximation de ces caractéristiques individuelles que nous ne connaissons pas. De façon générale, les caractéristiques sociales peuvent

se rapporter à d'autres facteurs, tels que la probabilité de faire des achats locaux et donc de soutenir les magasins et les restaurants de proximité, ce qui améliorera l'accessibilité; il peut s'agir d'une possession automobile plus faible en raison du niveau de revenu ou de choix personnels, de la situation financière qui influence la décision d'aller au restaurant ou de faire des achats.

Enfin, l'analyse du niveau d'équité sociale a mis en lumière d'une part les inégalités du territoire en matière de distribution de l'accessibilité au sein de la population totale, et a permis d'autre part d'isoler une partie de la population jugée comme vulnérable. En se basant sur une méthodologie utilisée dans la littérature, il a été possible d'observer des résultats qui confirment ceux présentés par les chercheurs : l'accessibilité piétonne est inégalement répartie sur le territoire, et les populations ayant un revenu faible bénéficient d'une meilleure accessibilité piétonne. Cependant, le revenu ne représente qu'une dimension de la vulnérabilité comme l'indique la littérature, ce qui implique de futures analyses sur le sujet, en considérant de nouvelles caractérisations des populations défavorisées.

Finalement, ce mémoire, en se basant sur les principes fondateurs de la ville des courtes distances, démontre l'importance de l'environnement bâti sur l'accessibilité piétonne à Montréal, et propose une première analyse de l'influence des caractéristiques sociales sur l'accessibilité. L'analyse de l'équité ouvre quant à elle le débat sur la question primordiale de la prise en compte des plus vulnérables à l'égard de l'accessibilité.

CHAPITRE 7 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce septième et dernier chapitre fournit une synthèse des travaux de recherche exposés dans ce mémoire, présente leurs contributions au domaine, avant d'évoquer les limites de la méthodologie. Enfin, quelques recommandations sont formulées, et des perspectives de recherche sont proposées.

7.1 Synthèse des travaux de recherche

Le présent projet de recherche s'est donné comme objectif principal d'analyser l'accessibilité piétonne dans le cadre de la ville des courtes distances, et dans une perspective d'équité sociale. Ce dernier s'inscrit dans une démarche financée par la Ville de Montréal et par Mitacs, dont le but est de développer des méthodologies ainsi qu'un outil interactif, qui permettent de générer et de visualiser des indicateurs d'accessibilité aux destinations.

Plus précisément, la problématique de ce mémoire a été formulée ainsi : **dans quelle mesure la forme urbaine et le milieu social sont-ils associés à l'accessibilité piétonne ?** Pour y répondre, quatre objectifs ont été énoncés : (1) *construire* les indicateurs d'accessibilité piétonne aux destinations, (2) *générer* une typologie de quartiers en fonction du niveau d'accessibilité, (3) *déterminer* les variables, en lien avec le concept de la ville des courtes distances, qui expliquent le niveau d'accessibilité piétonne à Montréal, et (4) *effectuer* une analyse du niveau d'équité sociale de l'accessibilité piétonne, en caractérisant notamment la vulnérabilité économique de la population à travers le revenu des ménages.

La satisfaction du premier objectif a nécessité la collecte et le traitement de données relatives aux données géolocalisées des destinations, dont la liste a été discutée avec la Ville de Montréal. Ces multiples lieux d'intérêt ont ensuite permis de créer une typologie, basée sur la littérature, composée de six types de destinations : culture, santé et services sociaux, éducation, zones commerciales, commerces alimentaires, activités sportives et récréatives. Les indicateurs d'accessibilité piétonne ont été générés selon la méthode des opportunités cumulées avec un seuil de 15 minutes de marche basé sur le réseau piéton (OSM) au niveau des îlots de diffusion : ce seuil est la garantie du respect du principe fondateur de la ville des courtes distances, dont l'enjeu est la satisfaction des besoins au sein d'un périmètre praticable à pied. L'accessibilité à la culture s'est montrée très peu répartie sur le territoire, à l'inverse de l'accessibilité à l'éducation et aux activités

sportives et récréatives. Globalement, les quartiers centraux de Montréal profitent d'une meilleure accessibilité piétonne, tandis que la banlieue observe une accessibilité piétonne très faible.

Pour répondre au second objectif et créer une typologie de quartiers en fonction du niveau d'accessibilité, la méthode de classification du k-moyennes a été utilisée, et a permis d'aboutir à quatre classes : la classe 1, intitulé *Quartiers à forte mixité – Highly mixed neighbourhoods* – en raison d'une accessibilité élevée à toutes les destinations, donc à une importante diversité de destinations ; la classe 2, dont la dénomination de *Villages Urbains – Urban villages* – s'explique par un très bon niveau d'accessibilité aux destinations ; la classe 3 des *Quartiers résidentiels avec des services de loisirs – Residential neighbourhoods with leisure services* – qui rassemble des zones principalement résidentielles en banlieue proche ; puis la classe 4 des *Quartiers à faible mixité – Low-mix neighbourhoods* – en raison du peu de diversité des opportunités accessibles depuis ces zones.

Cette typologie de quartiers a servi de base pour répondre au troisième objectif. En effet, des modèles de régression multinomiale logistique ont été générés, avec pour variable dépendante la classe (type de quartiers), et pour variables indépendantes différentes caractéristiques de l'environnement bâti et de l'environnement social. Ces modèles ont permis d'analyser l'influence de chaque variable indépendante sur la probabilité pour un îlot de diffusion d'appartenir aux différentes classes, et donc de conclure quant à l'impact de ces variables sur le niveau d'accessibilité piétonne. Comme le soutient la littérature, le milieu bâti joue un rôle fondamental dans l'accessibilité piétonne : celle-ci est positivement liée à une forte densité de population, une importante mixité des usages du sol, une densité d'intersections élevée, la présence de bâtiments anciens et une haute densité de logements. Les modèles ont néanmoins montré que l'éducation semble être un facteur clé dans le niveau d'accessibilité piétonne. En l'occurrence, l'accessibilité piétonne des quartiers s'explique en grande partie par la proportion de personnes bénéficiant d'un niveau d'éducation élevé : une forte accessibilité piétonne va de pair avec un niveau d'éducation lui-même important.

Enfin, le quatrième et dernier objectif a requis une analyse du niveau d'équité sociale au regard de l'accessibilité piétonne. La première étape a consisté en la mesure de l'équité de la répartition spatiale de l'accessibilité aux destinations (équité horizontale), à l'aide de courbes de Lorenz et de coefficients de Gini : l'accessibilité à la culture s'est montrée très inégalement distribuée sur le

territoire, de même que l'accessibilité aux zones commerciales et aux commerces alimentaires ; la distribution de l'accessibilité à l'éducation, à la santé et aux activités sportives et récréatives est en revanche plus équitable. Ensuite, l'identification des personnes vulnérables sur la base du revenu des ménages a permis de mesurer l'équité verticale, d'une part en étudiant l'accessibilité moyenne au sein de chaque catégorie de revenu, puis en examinant la distribution de l'accessibilité (équité horizontale) au sein de chaque catégorie (courbes de Lorenz et indices de Gini). Cette analyse a montré que les ménages les plus vulnérables (c'est-à-dire avec un revenu faible) profitent globalement d'une meilleure accessibilité piétonne que les ménages plus aisés, et que la distribution de l'accessibilité parmi les ménages les plus défavorisés est la plus équitable. Ces résultats sont fidèles à la littérature. Il est néanmoins nécessaire de les nuancer, dans la mesure où l'usage de l'automobile reste prédominant à Montréal : il est difficile pour des ménages ayant un revenu faible d'assumer les coûts liés à l'achat d'une voiture, ce qui les prive de l'accès à un certain nombre de destinations qui nécessitent une voiture.

7.2 Contributions de la recherche

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire contribue globalement à une vision plus claire de l'accessibilité piétonne à Montréal.

En premier lieu, la génération des indicateurs d'accessibilité aux destinations rend compte des disparités dont le territoire de la Ville de Montréal souffre en matière d'accessibilité piétonne. Cette étude identifie les principaux déterminants de l'accessibilité piétonne à Montréal, et agrmente ainsi le manque d'information dans la littérature.

En outre, l'analyse d'équité ouvre le débat sur l'importance de la prise en compte des populations vulnérables dans le cadre de l'accessibilité piétonne, à travers une méthode tirée de la littérature, basée sur la segmentation des ménages en fonction du revenu. Les conclusions quant au niveau d'équité face à l'accessibilité piétonne corroborent celles présentes dans la littérature, et permettent de proposer un nouveau cas d'étude à cette méthodologie.

Ces résultats, en offrant la possibilité de déceler les faiblesses du territoire en matière d'accessibilité, en fournissant les facteurs clés de l'accessibilité piétonne et en mettant en exergue les enjeux d'équité, sont une première source d'information pour d'éventuelles politiques publiques qui œuvreraient en faveur de la mobilité active. Les éléments de réponse décrits dans ce mémoire sont de potentiels leviers d'actions pour promouvoir la marche dans Montréal.

Par ailleurs, ce projet s'inscrit dans une démarche collaborative, dans la mesure où il fournit un cadre méthodologique potentiellement applicable à d'autres villes, et permet alors d'alimenter la recherche sur le sujet, afin que la mobilité active gagne *in fine* en popularité.

7.3 Limites de la méthodologie

La méthode qui a guidé la recherche présente des limites. La première concerne les destinations choisies pour le calcul de l'accessibilité. En effet, tous les lieux d'intérêt de Montréal n'ont pas été pris en compte, notamment par manque de données (par exemple, les centres communautaires). À l'avenir, il s'agit notamment de proposer une description plus précise et nuancée des destinations prises en compte. En ce qui concerne la culture par exemple, nous pouvons notamment réfléchir à la manière dont celle-ci est mesurée : qu'en est-il des lieux où les groupes (en particulier les petits groupes locaux) jouent ? qu'en est-il des lieux où se déroulent les événements culturels ?

La méthode de calcul de l'accessibilité, dite des opportunités cumulées (voir CHAPITRE 4), présente également des limites. En effet, comme cela a été discuté dans la revue de littérature (voir CHAPITRE 2), cette mesure présente des avantages en matière de facilité d'implémentation et d'interprétation. Ce choix a du sens, dans la mesure où ce projet s'inscrit dans une démarche plus globale de communication des résultats auprès des politiques et du public. Néanmoins, il ne permet pas de capter certaines nuances à l'égard de l'accessibilité : tout d'abord, cette méthode ne prend pas en considération la qualité des infrastructures piétonnes ; ensuite, il est impossible de pondérer les destinations comme le ferait une mesure gravitaire (en incluant un terme d'atténuation) ; enfin, son caractère agrégé ne permet pas de distinguer les comportements des individus, à la différence de mesures basées sur les individus ou sur l'utilité. Par ailleurs, le fait de considérer qu'une destination est accessible dès lors que le centroïde de l'îlot auquel elle appartient est à moins de 15 minutes de marche est également une simplification de la réalité. Une dernière limite au sujet du calcul de l'accessibilité concerne la non prise en compte des territoires limitrophes, notamment les villes liées : en réalité, les habitants du territoire d'étude peuvent se rendre dans les villes liées et profiter des opportunités qui s'y trouvent.

Par ailleurs, les résultats de l'étude, notamment les classes de quartiers, sont basés sur l'environnement bâti de Montréal. Les quartiers considérés comme très mixtes ici (en termes de destinations), ou nommés comme étant des « villages urbains », ne le seraient pas nécessairement si nous avions utilisé une autre ville. Dans ce projet, un poids égal a été donné à chaque catégorie,

mais certaines destinations peuvent être plus importantes que d'autres en termes de soutien aux déplacements à pied. Par exemple, les destinations culturelles sont probablement visitées à une fréquence beaucoup plus faible que les destinations de type alimentaire. Un système de pondération reflétant mieux le comportement réel des piétons améliorerait probablement la mesure.

Enfin, l'analyse de l'équité repose en partie sur la caractérisation des ménages en fonction du niveau de revenu. La segmentation de la population selon le revenu fournit des résultats intéressants, mais le revenu ne représente qu'une composante de la vulnérabilité. D'autres caractéristiques pourraient être envisagées (par exemple, potentielles incapacités physiques dues à l'âge ou à une condition particulière, milieu familial). Ce volet du travail de recherche permet néanmoins de proposer des premiers résultats concluants sur la thématique de l'équité dans l'accessibilité piétonne.

7.4 Recommandations

Au vu des résultats obtenus, plusieurs recommandations quant à la promotion de l'accessibilité piétonne peuvent être formulées.

La première recommandation se rapporte aux déterminants de l'accessibilité obtenus à l'aide des modèles de régression. En effet, ces modèles ont notamment mis en lumière l'importance de l'environnement bâti. En l'occurrence, il a été montré que la densité de population, la diversité des usages du sol, la densité d'intersections, la présence de bâtiments anciens et la densité de bâti sont autant de facteurs qui favorisent l'accessibilité à pied. Ces derniers représentent chacun un levier d'action potentiel pour de futures politiques publiques. Plus précisément, il est nécessaire de construire la ville sur la ville, en bâtissant à taille humaine et en mutualisant les usages au sein des quartiers. Il est important de limiter la taille des pâtés de maisons, afin de garantir une bonne connectivité, et d'encourager la pluralité des constructions, à la fois dans les usages et dans l'architecture (Jacobs, 1961b). L'enjeu est de créer des quartiers attractifs grâce à la mise en œuvre de ces recommandations, afin que les habitants de Montréal aient l'envie d'y habiter.

Par ailleurs, le travail de recherche a démontré l'importance de certains facteurs socio-économiques. En particulier, l'éducation est apparue comme un facteur fortement lié à l'accessibilité piétonne : il semble en effet plus probable que les personnes disposant d'un niveau d'éducation élevé habitent – ou choisissent d'habiter – dans des zones qui offrent une meilleure accessibilité. De plus, ces personnes bénéficient potentiellement d'un revenu plus important, ce qui

pourrait engendrer une situation inéquitable dans le cas où les quartiers offrant une bonne accessibilité ne seraient pas suffisamment disponibles. Le présent travail de recherche ne permet pas de dresser de recommandations claires quant à ce sujet, mais il soulève la question du « style de vie » recherché par les personnes ayant un niveau d'éducation élevé, qui expliquerait peut-être pourquoi ces dernières se trouvent plus souvent dans les zones à forte accessibilité.

L'analyse de niveau d'équité a quant à elle permis de dégager un axe de réflexion concernant la répartition spatiale de l'accessibilité. En effet, l'accessibilité aux destinations manque parfois de continuité, en particulier la culture, les zones commerciales et les commerces alimentaires, ce qui réduit l'accessibilité globale du territoire. Il serait donc utile, en plus de construire la ville sur la ville, de garantir une continuité de l'espace urbain, qui permettra de bénéficier d'une bonne accessibilité piétonne depuis n'importe quel endroit.

7.5 Perspectives

Dans le cadre de futures recherches sur le sujet, il serait tout d'abord intéressant d'utiliser une nouvelle mesure d'accessibilité, plus complexe, qui permettrait de pondérer les destinations dans un premier temps, et éventuellement de tenir compte des caractéristiques des infrastructures de transport et des individus. Cela garantirait une description plus complète de l'accessibilité. Par ailleurs, il serait plus pertinent de considérer la positions des destinations elles-mêmes plutôt que de se ramener au centroïde des îlots de diffusion, et de prendre en compte les opportunités présentes dans les zones limitrophes du territoire d'étude telles que les municipalités liées.

Dans la même idée, cette étude omet tout un volet du domaine des transports relatif à la théorie comportementale. En ce sens, il serait certainement utile de proposer des modèles comportementaux pour évaluer l'impact de modifications de l'espace urbain sur les comportements des usagers, et cibler ainsi plus précisément les leviers d'actions les plus prometteurs en matière d'accessibilité piétonne.

Ensuite, il pourrait être intéressant de comparer l'accessibilité piétonne à celle en voiture et en transport en commun, et de mener une analyse similaire (d'accessibilité et d'équité) sur l'ensemble des trois modes. En effet, comprendre les déterminants de l'accessibilité en voiture est aussi un moyen de comprendre les facteurs qui pourraient permettre de réduire son usage.

Enfin, l'évolution de ce projet consisterait à inclure l'accessibilité régionale. En effet, l'un des principaux freins à la marche réside dans l'impossibilité de parcourir de longues distances. Les habitants de Montréal ne vont certainement pas se contenter de vivre constamment au sein même de leur quartier, dans un rayon restreint autour de leur domicile. Il est nécessaire de bénéficier d'un moyen de transport autre que la voiture qui permette de voyager plus loin et plus longtemps. De futurs projets de recherche pourraient donc s'atteler à inclure les transports collectifs et les modes partagés (notamment l'autopartage avec Communauto) dans l'analyse de l'accessibilité piétonne. Il faut rappeler que l'objectif de ce genre d'étude est de proposer des solutions pour bannir la voiture de l'espace urbain, au profit des modes actifs et du transport en commun. Une telle ville pourrait potentiellement être composée d'une multitude de quartiers piétons, avec une continuité maximale, qui seraient traversés par différents moyens de transports collectifs afin d'offrir la possibilité aux habitants de profiter de l'ensemble de la ville sans jamais avoir besoin d'une voiture. À titre d'exemple, la ville de Singapour propose dans son *Plan directeur* le village des 20 minutes, couplé à la ville des 45 minutes, en encourageant les modes actifs, le transport en commun et les modes partagés : il s'agit de garantir l'accès aux besoins quotidiens en moins de 20 minutes, au sein du quartier, et de permettre de rejoindre les autres destinations (par exemple, son lieu de travail) en moins de 45 minutes (Land Transport Authority, 2019).

En conclusion, le présent travail de recherche permet de fournir de premiers résultats quant aux potentiels aménagements en faveur de l'accessibilité piétonne à Montréal. Ce dernier constitue un point de départ pour de futurs chercheurs qui souhaiteraient aller plus loin dans l'analyse, en proposant des indicateurs d'accessibilité plus précis ainsi qu'une description plus complète des caractéristiques des individus et du milieu urbain. L'accessibilité piétonne est une thématique fondamentale dans le contexte actuel qui vise à décarboner les villes, et la recherche sur le sujet rend cette vision de plus en plus concrète.

RÉFÉRENCES

- Ahmadian, E., Sodagar, B., Mills, G., Byrd, H., Bingham, C., & Zolotas, A. (2019). Sustainable cities: The relationships between urban built forms and density indicators. *Cities*, 95, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.06.013>
- Alam, B. M., Thompson, G. L., & Brown, J. R. (2010). Estimating Transit Accessibility with an Alternative Method: Evidence from Broward County, Florida. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2144(1), 62–71. <https://doi.org/10.3141/2144-08>
- Apparicio, P., Abdelmajid, M., Riva, M., & Shearmur, R. (2008). Comparing alternative approaches to measuring the geographical accessibility of urban health services: Distance types and aggregation-error issues. *International Journal of Health Geographics*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-7-7>
- Apparicio, P., & Séguin, A.-M. (2006). Measuring the Accessibility of Services and Facilities for Residents of Public Housing in Montréal. *Urban Studies*, 43(1), 187–211. <https://doi.org/10.1080=00420980500409334>
- ARTM. (2020). *Enquête Origine-Destination 2018—La mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal—Tableaux des résultats par secteurs municipaux* (pp. 31–34). https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/06/document-mobilite_EOD_2018.pdf
- Azmoodeh, M., Haghighi, F., & Motieyan, H. (2021). Proposing an integrated accessibility-based measure to evaluate spatial equity among different social classes. *Environment and Planning B-Urban Analytics and City Science*, 48(9), 2790–2807. <https://doi.org/10.1177/2399808321991543>
- Bertolini, L., Le Clercq, F., & Kapoen, L. (2005). Sustainable accessibility: A conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. *Transport Policy*, 12(3), 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006>
- Bibri, S. E., Krogstie, J., & Kärrholm, M. (2020). Compact city planning and development: Emerging practices and strategies for achieving the goals of sustainability. *Developments in the Built Environment*, 4, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100021>
- Black, J. A., Paez, A., & Suthanaya, P. A. (2002). Sustainable Urban Transportation: Performance

Indicators and Some Analytical Approaches. *Journal of Urban Planning and Development*, 128(4), 184–209. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9488\(2002\)128:4\(184\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9488(2002)128:4(184))

Brown, B. B., Yamada, I., Smith, K. R., Zick, C. D., Kowaleski-Jones, L., & Fan, J. X. (2009). Mixed land use and walkability: Variations in land use measures and relationships with BMI, overweight, and obesity. *Health & Place*, 15(4), 1130–1141. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2009.06.008>

Brown, M. C. (1994). Using gini-style indices to evaluate the spatial patterns of health practitioners: Theoretical considerations and an application based on Alberta data. *Social Science & Medicine*, 38(9), 1243–1256. [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(94\)90189-9](https://doi.org/10.1016/0277-9536(94)90189-9)

Burgess, R. (2000). The Compact City Debate: A Global Perspective. In *Compact Cities: Sustainable Urban Forms for Developing Countries* (Burgess, R., Jenks, M., pp. 9–24). Spon Press.

Burton, E. (2002). Measuring urban compactness in UK towns and cities. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 29(2), 219–250. <https://doi.org/10.1068/b2713>

Camporeale, R., Caggiani, L., Fonzone, A., & Ottomanelli, M. (2017). Quantifying the impacts of horizontal and vertical equity in transit route planning. *Transportation Planning and Technology*, 40(1), 28–44. <https://doi.org/10.1080/03081060.2016.1238569>

Canadian Census. (2021). *Profile of Census Disseminations Areas*. Computing in the Humanities and Social Sciences - Canadian Census Analyser - 2021 Census Profiles Files. <http://datacentre.chass.utoronto.ca/cgi-bin/census/2021/displayCensus.cgi?year=2021&geo=da>

Capasso Da Silva, D., King, D. A., & Lemar, S. (2019). Accessibility in Practice: 20-Minute City as a Sustainability Planning Goal. *Sustainability*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su12010129>

Cascetta, E., Cartenì, A., Henke, I., & Pagliara, F. (2020). Economic growth, transport accessibility and regional equity impacts of high-speed railways in Italy: Ten years ex post evaluation and future perspectives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 139, 412–428. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.008>

Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demande and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transpn Res.-D*, 199–219. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(97)00009-6)

Cervero, R., & Radisch, C. (1996). Travel choices in pedestrian versus automobile oriented

- neighborhoods. *Transport Policy*, 3(3), 127–141. [https://doi.org/10.1016/0967-070X\(96\)00016-9](https://doi.org/10.1016/0967-070X(96)00016-9)
- Cervero, R., Sarmiento, O. L., Jacoby, E., Gomez, L. F., & Neiman, A. (2009). Influences of Built Environments on Walking and Cycling: Lessons from Bogotá. *International Journal of Sustainable Transportation*, 3(4), 203–226. <https://doi.org/10.1080/15568310802178314>
- Chang, H.-S., & Liao, C.-H. (2011). Exploring an integrated method for measuring the relative spatial equity in public facilities in the context of urban parks. *Cities*, 28(5), 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.04.002>
- Chen, A., Yang, C., Kongsomsaksakul, S., & Lee, M. (2007). Network-based Accessibility Measures for Vulnerability Analysis of Degradable Transportation Networks. *Networks and Spatial Economics*, 7(3), 241–256. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9012-5>
- Chen, N., & Akar, G. (2017). How do socio-demographics and built environment affect individual accessibility based on activity space? Evidence from Greater Cleveland, Ohio. *Journal of Transport and Land Use*, 10(1), 477–503. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2016.861>
- Cho, S. E., & Kim, S. (2017). Measuring urban diversity of Songjiang New Town: A re-configuration of a Chinese suburb. *Habitat International*, 66, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2017.05.009>
- Clifton, K. J., Burnier, C. V., & Akar, G. (2009). Severity of injury resulting from pedestrian–vehicle crashes: What can we learn from examining the built environment? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.001>
- Cortés, Y. (2021). *Spatial Accessibility to Local Public Services in an Unequal Place: An Analysis from Patterns of Residential Segregation in the Metropolitan Area of Santiago, Chile*. 1–20.
- CTR International Inc. (2023). *CTR International • Conteneurs Maritimes*. CTR International • Conteneurs Maritimes. <https://ctrinternational.ca/>
- Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). The measurement of accessibility: Some preliminary results. *Transportation* 5, 14–42. <https://doi.org/10.1007/BF00165245>
- Delbosc, A., & Currie, G. (2011). Using Lorenz curves to assess public transport equity. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1252–1259. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.02.008>

DMTI. (2020).

Données Québec. (2022a). *Fichiers cartographiques M02 des installations et établissements—Données Québec*. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/fichiers-cartographiques-m02-des-installations-et-etablissements>

Données Québec. (2022b). *Localisation des établissements d'enseignement du réseau scolaire au Québec—Données Québec*. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/localisation-des-etablissements-d-enseignement-du-reseau-scolaire-au-quebec>

Dovey, K., & Pafka, E. (2014). The urban density assemblage: Modelling multiple measures. *URBAN DESIGN International*, 19(1), 66–76. <https://doi.org/10.1057/udi.2013.13>

Duncan, O. D., & Duncan, B. (1955). A Methodological Analysis of Segregation Indexes. *American Sociological Review*, 20(2), 210–217. <https://doi.org/10.2307/2088328>

El-Geneidy, A., & Levinson, D. (2011). Place Rank: Valuing Spatial Interactions. *Networks and Spatial Economics*, 11(4), 643–659. <https://doi.org/10.1007/s11067-011-9153-z>

El-Geneidy, A., Levinson, D., Diab, E., Boisjoly, G., Verbich, D., & Loong, C. (2016). The cost of equity: Assessing transit accessibility and social disparity using total travel cost. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 91, 302–316. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.07.003>

Frank, L. D., & Pivo, G. (1994). Impacts of Mixed Use and Density on Utilization of Three Modes of Travel: Single-Occupant Vehicle, Transit, and Walking. *Transportation Research Record*, 1466, 44–52.

Gaxiola-Beltrán, A. L., Narezo-Balzaretti, J., Ramírez-Moreno, M. A., Pérez-Henríquez, B. L., Ramírez-Mendoza, R. A., Krajzewicz, D., & Lozoya-Santos, J. de-Jesús. (2021). Assessing Urban Accessibility in Monterrey, Mexico: A Transferable Approach to Evaluate Access to Main Destinations at the Metropolitan and Local Levels. *Applied Sciences*, 11(16), 1–28. <https://doi.org/10.3390/app11167519>

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Ghosh, P. A., & Raval, P. M. (2021). Modelling urban mixed land-use prediction using influence

parameters. *GeoScape*, 15(1), 66–78. <https://doi.org/10.2478/geosc-2021-0006>

Gong, P., Chen, B., Li, X., Liu, H., Wang, J., Bai, Y., Chen, J., Chen, X., Fang, L., Feng, S., Feng, Y., Gong, Y., Gu, H., Huang, H., Huang, X., Jiao, H., Kang, Y., Lei, G., Li, A., ... Xu, B. (2020). Mapping essential urban land use categories in China (EULUC-China): Preliminary results for 2018. *Science Bulletin*, 65(3), 182–187. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2019.12.007>

Gouvernement du Québec. (2023a). *Feuille de route—L'aménagement du territoire—Plan directeur en transition énergétique*. <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/plan-directeur-en-transition-energetique/feuilles-de-route/detail/lamenagement-du-territoire>

Gouvernement du Québec. (2023b). *Feuille de route—Le transport et la mobilité—Plan directeur en transition énergétique*. <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/plan-directeur-en-transition-energetique/feuilles-de-route/detail/le-transport-et-la-mobilite>

Gouvernement du Québec. (2023c). *Feuilles de route—Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques*. <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/plan-directeur-en-transition-energetique/feuilles-de-route>

Guimarães, G. V., Santos, T. F., Fernandes, V. A., Maquilón, J. E. C., & da Silva, M. A. V. (2020). Assessment for the Social Sustainability and Equity under the Perspective of Accessibility to Jobs. *Sustainability*, 12(23), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su122310132>

Hägerstraand, T. (1970). WHAT ABOUT PEOPLE IN REGIONAL SCIENCE? *Papers in Regional Science*, 24(1), 7–24. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x>

Hajna, S., Dasgupta, K., Joseph, L., & Ross, N. A. (2014). A call for caution and transparency in the calculation of land use mix: Measurement bias in the estimation of associations between land use mix and physical activity. *Health & Place*, 29, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2014.06.002>

Hansen, W. G. (1959). How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*, 73–76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>

Hirschman, A. O. (1964). The paternity of an index. *The American Economic Review*, 54(5), 761–762.

Hong, J., Shen, Q., & Zhang, L. (2014). How do built-environment factors affect travel behavior?

A spatial analysis at different geographic scales. *Transportation*, 41(3), 419–440. <https://doi.org/10.1007/s11116-013-9462-9>

Jabareen, Y. R. (2006). Sustainable Urban Forms: Their Typologies, Models, and Concepts. *Journal of Planning Education and Research*, 26(1), 38–52. <https://doi.org/10.1177/0739456X05285119>

Jacobs, J. (1961a). Some myths about diversity. In *The Death and Life of Great American Cities* (pp. 222–238). Random House.

Jacobs, J. (1961b). *The Death and Life of Great American Cities*. Random House.

Jenks, M. (2000). The acceptability of urban intensification. In *Achieving Sustainable Urban Form* (Williams, Katie, Burton, Elizabeth (Eds.), pp. 242–250). Mike Jenks E. & FN Spon.

Jiao, J., Rollo, J., & Fu, B. (2021). The Hidden Characteristics of Land-Use Mix Indices: An Overview and Validity Analysis Based on the Land Use in Melbourne, Australia. *Sustainability*, 13(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su13041898>

Jordan, D. R., & Horan, T. A. (1997). Intelligent Transportation Systems and Sustainable Communities: Findings of a National Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1588(1), 70–76. <https://doi.org/10.3141/1588-09>

Kaplan, S., Popoks, D., Prato, C. G., & Ceder, A. (Avi). (2014). Using connectivity for measuring equity in transit provision. *Journal of Transport Geography*, 37, 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.04.016>

Kelobonye, K., Zhou, H., McCarney, G., & Xia, J. (Cecilia). (2020). Measuring the accessibility and spatial equity of urban services under competition using the cumulative opportunities measure. *Journal of Transport Geography*, 85, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102706>

Kim, T., & Kim, H. (2013). Analysis of the effects of intra-urban spatial structures on carbon footprint of residents in Seoul, Korea. *Habitat International*, 38, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2012.06.006>

Koenig, J. G. (1980). Indicators of urban accessibility: Theory and application. *Transportation*, 9(2), 145–172. <https://doi.org/10.1007/BF00167128>

Koohsari, M. J., Mavoa, S., Villanueva, K., Sugiyama, T., Badland, H., Kaczynski, A. T., Owen,

- N., & Giles-Corti, B. (2015). Public open space, physical activity, urban design and public health: Concepts, methods and research agenda. *Health & Place*, 33, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2015.02.009>
- Kotharkar, R., Bahadure, P., & Sarda, N. (2014). Measuring Compact Urban Form: A Case of Nagpur City, India. *Sustainability*, 6(7), 4246–4272. <https://doi.org/10.3390/su6074246>
- Kwan, M.-P., & Weber, J. (2003). Individual Accessibility Revisited: Implications for Geographical Analysis in the Twenty-first Century. *Geographical Analysis*, 35(4), 341–353. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2003.tb01119.x>
- Land Transport Authority. (2019). *Land Transport Master Plan 2040* (pp. 12–21). Government of Singapore. https://www.lta.gov.sg/content/dam/ltagov/who_we_are/our_work/land_transport_master_plan_2040/pdf/LTA%20LTMP%202040%20eReport.pdf
- Langevin, J., Rocque, S., Chalghoumi, H., & Ghorayeb, A. (2011). *Rapport de recherche pour les milieux associatifs de Montréal – Accessibilité universelle et designs contributifs (version 5.3)*. Université de Montréal.
- Laviolette, J., Morency, C., Waygood, O. D., & Goulias, K. G. (2021). Car Ownership and the Built Environment: A Spatial Modeling Approach. *Transportation Research Record*, 2676(3), 125–141. <https://doi.org/10.1177/03611981211049409>
- Leyden, K. M. (2003). Social capital and the built environment: The importance of walkable neighborhoods. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1546–1551. <https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1546>
- Li, M., Kwan, M.-P., Yin, J., Yu, D., & Wang, J. (2018). The potential effect of a 100-year pluvial flood event on metro accessibility and ridership: A case study of central Shanghai, China. *Applied Geography*, 100, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.09.001>
- Li, Q., Chen, X., Jiao, S., Song, W., Zong, W., & Niu, Y. (2022). Can Mixed Land Use Reduce CO2 Emissions? A Case Study of 268 Chinese Cities. *Sustainability*, 14(22), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su142215117>
- Logan, T. M., Hobbs, M. H., Conrow, L. C., Reid, N. L., Young, R. A., & Anderson, M. J. (2022). The x-minute city: Measuring the 10, 15, 20-minute city and an evaluation of its use for sustainable

urban design. *Cities*, 131, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103924>

Lorenz, M. O. (1905). Methods of measuring the concentration of wealth. *Publications of the American Statistical Association*, 9(70), 209–219. <https://doi.org/10.2307/2276207>

Lu, Q.-C., Xu, P.-C., & Zhang, J. (2021). Infrastructure-based transportation network vulnerability modeling and analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 584, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126350>

Lu, Y., Xiao, Y., & Ye, Y. (2017). Urban density, diversity and design: Is more always better for walking? A study from Hong Kong. *Preventive Medicine*, 103, S99–S103. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2016.08.042>

Luo, H., Zhao, S., & Yao, R. (2021). Determinants of Housing Prices in Dalian City, China: Empirical Study Based on Hedonic Price Model. *Journal of Urban Planning and Development*, 147(2), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000698)

Manaugh, K., & Kreider, T. (2013). What is mixed use? Presenting an interaction method for measuring land use mix. *Journal of Transport and Land Use*, 6(1), 63–72. <https://doi.org/10.5198/jtlu.v6i1.291>

Marchés publics de Montréal. (2022). *Marchés publics de Montréal*. La Société des Marchés publics de Montréal. <https://www.marchespublics-mtl.com/carte/>

Mavoa, S., Boulange, C., Eagleson, S., Stewart, J., Badland, H. M., Giles-Corti, B., & Gunn, L. (2018). Identifying appropriate land-use mix measures for use in a national walkability index. *Journal of Transport and Land Use*, 11(1), 681–700. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1132>

Mavoa, S., Witten, K., McCreanor, T., & O’Sullivan, D. (2012). GIS based destination accessibility via public transit and walking in Auckland, New Zealand. *Journal of Transport Geography*, 20(1), 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.10.001>

MELCCC. (2021a). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990* (pp. 26–29). Gouvernement du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019.pdf>

MELCCC. (2021b). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990* (p. 15). Gouvernement du Québec.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019.pdf>

Mohri, S. S., Mortazavi, S., & Nassir, N. (2021). A clustering method for measuring accessibility and equity in public transportation service: Case study of Melbourne. *Sustainable Cities and Society*, 74, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103241>

Navarrete-Hernandez, P., & Laffan, K. (2019). A greener urban environment: Designing green infrastructure interventions to promote citizens' subjective wellbeing. *Landscape and Urban Planning*, 191, 103618. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103618>

Nieuwenhuijsen, M., Bastiaanssen, J., Sersli, S., Waygood, E. O. D., & Khreis, H. (2019). Implementing Car-Free Cities: Rationale, Requirements, Barriers and Facilitators. In *Integrating Human Health into Urban and Transport Planning* (Nieuwenhuijsen, M., Khreis, H., pp. 199–219). Springer.

Pereira, R. H. M., Saraiva, M., Herszenhut, D., & Braga, C. K. V. (2021). R5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R5 in R. *Findings*. <https://doi.org/10.32866/001c.21262>

Preston, J., & Rajé, F. (2007). Accessibility, mobility and transport-related social exclusion. *Journal of Transport Geography*, 15(3), 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.05.002>

R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Rabiei-Dastjerdi, H., Matthews, S. A., & Ardalan, A. (2018). Measuring Spatial Accessibility to Urban Facilities and Services in Tehran. *Spatial Demography*, 6(1), 17–34. <https://doi.org/10.1007/s40980-016-0028-2>

Rahimi, H. (2022). Assessment of the spatial difference at the level of neighborhoods based on accessibility variables in Yazd city, Iran. *GeoJournal*. <https://doi.org/10.1007/s10708-022-10786-2>

Ricciardi, A. M., Xia, J., & Currie, G. (2015). Exploring public transport equity between separate disadvantaged cohorts: A case study in Perth, Australia. *Journal of Transport Geography*, 43, 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.01.011>

Sager, T. (2006). Freedom as Mobility: Implications of the Distinction between Actual and

Potential Travelling. *Mobilities*, 1(3), 465–488. <https://doi.org/10.1080/17450100600902420>

Seong, E. Y., Lee, N. H., & Choi, C. G. (2021). Relationship between Land Use Mix and Walking Choice in High-Density Cities: A Review of Walking in Seoul, South Korea. *Sustainability*, 13(2), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su13020810>

Sharma, G., & Patil, G. R. (2021). Public transit accessibility approach to understand the equity for public healthcare services: A case study of Greater Mumbai. *Journal of Transport Geography*, 94, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103123>

Song, Y., Merlin, L., & Rodriguez, D. (2013). Comparing measures of urban land use mix. *Computers, Environment and Urban Systems*, 42, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2013.08.001>

Statistique Canada. (2021a, November 17). *Dictionnaire, Recensement de la population, 2021 – Îlot de diffusion (ID)*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/dict/az/definition-fra.cfm?ID=geo014>

Statistique Canada. (2021b, November 17). *Recensement de 2021—Fichiers des limites*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/geo/sip-pis/boundary-limités/index2021-fra.cfm?year=21>

St-Louis, A. (2021). *Accessibilité universelle: La conception d'environnements pour tous* (6; OPUS, p. 3). Institut National de Santé Publique du Québec. <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/2775-accessibilite-universelle-conception-environnements.pdf>

Sun, G., Lin, H., & Li, R. (2012). Measuring the Influence of Built Environment on Walking Behavior: An Accessibility Approach. *Geographic Information Science, LNCS 7478*, 187–197. https://doi.org/10.1007/978-3642-33024-7_14

SYTRAL. (2018). *Enquête déplacements 2015 de l'aire métropolitaine lyonnaise—Pratiques de déplacements sur les bassins de vie du Scot de l'agglomération lyonnaise* (pp. 16–17).

Tahmasbi, B., & Haghshenas, H. (2019). Public transport accessibility measure based on weighted door to door travel time. *Computers, Environment and Urban Systems*, 76, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2019.05.002>

Tahmasbi, B., Mansourianfar, M. H., Haghshenas, H., & Kim, I. (2019). Multimodal accessibility-based equity assessment of urban public facilities distribution. *Sustainable Cities and Society*, 49, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101633>

Transportation Research Board of the National Academy. (1996). *Transit and urban form* (16). Transportation Research Board of the National Academy.

United Nations. (1987). *Our Common Future*.

United Nations. (1993). *Earth Summit Agenda 21: The UN Programme of Action from Rio*.

Vale, D. S., Saraiva, M., & Pereira, M. (2015). Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, 9(1), 209–235. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2015.593>

Ville de Montréal. (2022a). *Données brutes du Service des sports et des parcs (BdD_PDISI_050822.csv)*.

Ville de Montréal. (2023a). *Feuille de route—Vers des transports zéro émission dès 2040—Agir ensemble pour une ville verte, équitable et sécuritaire*. https://portail-m4s.s3.montreal.ca/pdf/feuille_de_route_-_vers_des_transports_zero_emission_des_2040_0.pdf

Ville de Montréal. (2017). *Lieux culturels municipaux de Montréal—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal. <https://donnees.montreal.ca/dataset/lieux-culturels>

Ville de Montréal. (2021a). *Locaux commerciaux et statuts d'occupation—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal. <https://donnees.montreal.ca/dataset/locaux-commerciaux>

Ville de Montréal. (2021b). *Montréal en statistiques—Population totale* [Web page]. Ville de Montréal. http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=6897,67887840&_dad=portal&_schema=PORTAL

Ville de Montréal. (2022b). *Établissements alimentaires—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal. <https://donnees.montreal.ca/dataset/etablissements-alimentaires>

Ville de Montréal. (2022c). *Grands parcs, parcs d'arrondissements et espaces publics—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal.

<https://donnees.montreal.ca/dataset/grands-parcs-parcs-d-arrondissements-et-espaces-publics>

Ville de Montréal. (2022d). *Installations récréatives, sportives et culturelles extérieures—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal.

<https://donnees.montreal.ca/dataset/installations-recreatives-sportives-et-culturelles>

Ville de Montréal. (2023b). *Géobase—Réseau routier—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal. <https://donnees.montreal.ca/dataset/geobase>

Ville de Montréal. (2023c). *Unités d'évaluation foncière—Site web des données ouvertes de la Ville de Montréal*. Ville de Montréal. <https://donnees.montreal.ca/dataset/unites-evaluation-fonciere>

Vuori, I. (1998). Does physical activity enhance health? *Patient Education and Counseling*, 33, 95–103. [https://doi.org/10.1016/S0738-3991\(98\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0738-3991(98)00014-7)

Welch, T. F. (2013). Equity in transport: The distribution of transit access and connectivity among affordable housing units. *Transport Policy*, 30, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.09.020>

Welch, T. F., & Mishra, S. (2013). A measure of equity for public transit connectivity. *Journal of Transport Geography*, 33, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.09.007>

Wo, J. C. (2019). Mixed land use and neighborhood crime. *Social Science Research*, 78, 170–186. <https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2018.12.010>

Yoon, S., & Goulias, K. (2010). Impact of time-space prism accessibility on time use behavior and its propagation through intra-household interaction. *Transportation Letters*, 2(4), 245–260. <https://doi.org/10.3328/TL.2010.02.04.245-260>

Zhong, J., & Hui, E. C. M. (2021). Real option and vertical mixed-use development. *International Journal of Strategic Property Management*, 25(5), 382–395. <https://doi.org/10.3846/ijspm.2021.15059>

Zhou, H., He, S., Cai, Y., Wang, M., & Su, S. (2019). Social inequalities in neighborhood visual walkability: Using street view imagery and deep learning technologies to facilitate healthy city planning. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101605. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101605>