POLYPUBLIE

Étude de mesures d'accessibilité dynamiques en transport collectif

Tristan Georges Jacques Dupont

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	2025
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie PolyPublie URL	https://publications.polymtl.ca/64451/
Conditions d'utilisation Terms of use	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence Citation	Dupont, T. G. J. (2025). Étude de mesures d'accessibilité dynamiques en transport collectif [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/64451/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche Advisors	Catherine Morency
Programme Program	Génie civil

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Étude de mesures d'accessibilité dynamiques en transport collectif

TRISTAN GEORGES JACQUES DUPONT

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie Civil

Février 2025

© Tristan Georges Jacques Dupont, 2025.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Étude de mesures d'accessibilité dynamiques en transport collectif

présenté par **Tristan Georges Jacques DUPONT**

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

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

Geneviève BOISJOLY, présidente

Catherine MORENCY, membre et directrice de recherche

Geneviève LAPOINTE, membre externe

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier ma directrice de recherche Catherine Morency de m'avoir permis de réaliser ce projet, par sa confiance, ses précieux conseils et par la diversité d'opportunités offertes tout au long du cursus. Je tiens également à remercier les nombreuses personnes qui ont donné de leur temps pour m'aider à avancer sur cette recherche : un grand merci à Hubert Verreault, Geneviève Bastien, Jean-François Cantin, Jérémy Gelb et Geneviève Boisjoly. Je remercie la Chaire Mobilité et ses différents partenaires pour le financement de ce projet et pour les enrichissantes rencontres faites pendant ses deux années. Je souhaite enfin remercier ma famille et mes amis pour leur soutien à toute épreuve, qui fait partie intégrante de l'aventure.

RÉSUMÉ

L'accessibilité est un indicateur couramment utilisé en planification des transports, en stratégie d'utilisation du sol ou encore pour diagnostiquer l'équité spatiale ou sociale. L'accessibilité a souvent été définie comme la facilité d'accès à des activités par un mode de transport et à une heure donnée. Geurs et Van Wee (2004) définissent les quatre composantes de l'accessibilité comme étant le système de transport, l'utilisation du sol, l'individu et le temps. Ces termes ont largement été repris par la communauté scientifique mais la plupart des études d'accessibilité n'incluent pas les quatre composantes. En effet, les mesures les plus populaires sont les mesures basées sur la localisation qui intègrent très bien le système de transport et l'utilisation du sol mais plus rarement les individus et le temps. Mais ces dernières années, le développement des données GTFS a permis la croissance des études d'accessibilité en transport en commun intégrant les variations de service de transport au cours du temps. Cependant, les dynamiques des deux autres composantes de l'accessibilité sont généralement ignorées et le caractère dynamique de l'accessibilité est inégalement intégré aux différentes mesures.

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur différentes mesures d'accessibilité
- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur des diagnostics d'équité
- Proposer une méthode d'évaluation d'équité verticale dynamique, basée sur le concept suffisantiste

Pour répondre à ces différents objectifs, l'accessibilité est mesurée aux commerces alimentaires en transport collectif sur l'île de Montréal, toutes les 15 minutes au cours d'une journée de semaine entre 7 :00 et 22 :00 avec quatre mesures d'accessibilité différentes et en intégrant au fur et à mesure les dynamiques des composantes urbaines. Dans un premier temps la population, les opportunités et le réseau de transport sont considérés comme statiques. Ensuite les dynamiques sont intégrées dans l'ordre suivant : d'abord les variations du service de transport sont considérées, puis les horaires des opportunités et enfin les mouvements de population. Les différentes mesures d'accessibilité étudiées sont : la mesure d'opportunités cumulées, la mesure gravitaire, la mesure par zone de captage en deux étapes (ou mesure « two-step floating catchment area » abrégée en 2SFCA pour la suite du mémoire), ainsi que la mesure 2SFCA modifiée. A partir de ces mesures,

un diagnostic d'équité horizontal et un diagnostic vertical sont menés : le premier avec l'indice de Gini et le second avec le coefficient de corrélation de Spearman. Ce dernier coefficient est calculé entre des rangs de vulnérabilité et des rangs d'accessibilité (classements des niveaux de vulnérabilité et des niveaux d'accessibilité), qui sont définis selon quatre méthodes. La première définit les rangs d'accessibilité selon la médiane et les trois autres intègrent le concept suffisantiste, pour définir les parts de la population au-dessus du seuil de suffisance.

L'analyse des différentes mesures d'accessibilité montre que l'intégration des dynamiques des trois composantes urbaines a un impact considérable sur les quatre mesures d'accessibilité. Tout d'abord en termes d'accessibilité totale mesurée, l'intégration des dynamiques des opportunités et des individus ont le plus d'effet. La considération des horaires d'ouverture des commerces induit peu de différences en milieu de journée mais de grandes variations en début et en fin de journée. À l'inverse, les déplacements des individus en milieu de journée vers les zones denses en activités impliquent une meilleure accessibilité mesurée de la population. Cette dernière considération dynamique modifie la distribution de l'accessibilité sur les individus (moins bonne corrélation entre les mesures). Cela se ressent directement sur les diagnostics d'équité. Les évaluations d'équité horizontale indiquent généralement une répartition de l'accessibilité moins juste lorsque toutes les composantes dynamiques sont intégrées aux mesures. Au contraire, elles indiquent généralement (dans le cas le plus dynamique) une répartition plus juste entre les individus quand l'équité verticale est étudiée. Malgré cette tendance, les résultats des analyses d'équité sont très dépendants de la méthodologie employée, du contexte statique-dynamique et de la mesure d'accessibilité : les conclusions des diagnostics d'équité varient d'une étude à une autre.

De manière générale, l'intégration des dynamiques des composantes urbaines entraînent des conséquences non négligeables sur l'accessibilité mesurée et sa distribution sur les individus et dans le temps. Ces dynamiques ne doivent pas être négligées et leur intégration doit être considérée dépendamment de l'étude et de la mesure utilisée.

ABSTRACT

Accessibility is a commonly used indicator in transportation planning, land-use strategies and spatial or social equity diagnostics. Accessibility has often been defined as the ease of access to activities by a given mode of transport at a given time. Geurs and Van Wee (2004) defined the four components of accessibility as transport system, land use, individual, and time. These terms have been widely adopted by the scientific community, but most accessibility studies do not include all four components. Indeed, the most popular measures are location-based ones, which integrate the transport system and land use effectively, but rarely include individuals and time. In recent years, the development of GTFS data has enabled the growth of transit accessibility studies that integrate variations in transit service over time. However, the dynamics of the other two components of accessibility are generally ignored, and the dynamic nature of accessibility is unevenly integrated into the various measures.

The objectives of this research are as follows:

- Study the impact of integrating each urban dynamic on different accessibility measures
- Analyse the impact of the integration of each urban dynamic on equity diagnostics
- Propose a dynamic vertical equity evaluation method, based on the sufficientarist concept

To meet these different objectives, accessibility to food stores by public transit on the island of Montreal was measured every 15 minutes during a weekday between 7 :00 and 22 :00, using four different accessibility measures and gradually integrating the dynamics of urban components. Initially, the population, opportunities and transport network are considered static. Then the dynamics are integrated in the following order: first, variations in transport service are considered, followed by opportunity schedules, and finally, population movements. The various accessibility measures studied are: the cumulative opportunities measure, the gravity measure, the two-step floating catchment area measure (2SFCA), and the modified 2SFCA measure. Based on these measures, a horizontal and a vertical diagnosis of equity are carried out: the first with the Gini index and the second with Spearman's correlation coefficient. This coefficient is calculated between vulnerability ranks and accessibility ranks, which are defined according to four methods. The first defines accessibility ranks according to the median, while the other three incorporate the sufficientarist concept, to define population shares above the sufficiency threshold.

Analysis of the different accessibility measures shows that integrating the dynamics of the three urban components has a considerable impact on the four accessibility measures. Firstly, in terms of total accessibility measured, integrating the dynamics of opportunities and individuals has the greatest effect. Consideration of shop business hours produces few differences in the middle of the day, but large variations at the beginning and at the end of the day. Conversely, the movement of individuals in the middle of the day towards areas with a high density of activities implies a better measured accessibility of the population. This last dynamic consideration modifies the distribution of accessibility across individuals (lower correlation between measurements). This has a direct impact on equity evaluations. Horizontal equity evaluations generally indicate a less fair distribution of accessibility when all the dynamic components are included in the measures. On the contrary, they generally indicate (in the most dynamic case) a fairer distribution between individuals when vertical equity is studied. Despite this trend, the results of equity analyses are highly dependent on the methodology used, the static-dynamic context and the accessibility measure: the conclusions of equity evaluations vary from one study to another.

In general, the integration of the dynamics of urban components has significant consequences on measured accessibility and its distribution over individuals and over time. These dynamics must not be neglected and their integration must be considered depending on the study and the measure used.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS III

RÉSUMÉ IV

ABSTRACT VI

LISTE DES TABLEAUX XI

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XV

LISTE DES ANNEXES XVI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

1.1 Problématique 1

1.2 Objectifs de la recherche 2

1.3 Structure du mémoire 3

CHAPITRE 2 REVUE LITTERAIRE 5

2.1 Accessibilité 5

2.1.1 Définition 5

2.1.2 Pourquoi mesurer l'accessibilité ? 6

2.1.3 Mesures d'accessibilité 7

2.1.4 Métriques de l'accessibilité spatiale 12

2.1.5 Accessibilité dynamique 18

2.2 Équité 21

2.2.1 Principes de distribution 21

2.2.2 Équité et transport 22

2.3 Synthèse 28

CHAPITRE 3 METHODOLOGIE 30

3.1 Méthodologie générale 30
3.2 Contexte d'étude 34
3.3 Description des données 36
3.3.1 Rôle d'évaluation foncière 36
3.3.2 OpenStreetMap 37
3.3.3 Google Maps 39
3.3.4 Données GTFS 40
3.3.5 Enquête Origine Destination 2018 42
3.3.6 Recensement canadien 2016 42
3.4 Cadres d'étude statiques-dynamiques 43
3.5 Mesures d'accessibilité 44
3.5.1 Opportunités cumulées 46
3.5.2 Mesure gravitaire 46
3.5.3 Mesure 2SFCA 46
3.5.4 Mesure M2SFCA 47
3.5.5 Origines des mesures d'accessibilité 48
3.5.6 Coût du trajet 49
3.6 Transport 51
3.6.1 Transition 51
3.6.2 Calcul du temps de trajet 54
3.6.3 Statique 55
3.6.4 Dynamique 55
3.7 Opportunités 58
3.7.1 Poids des commerces 59

3.7.2 Statique....61
3.7.3 Dynamique....61
3.8 Population....65
3.8.1 Méthodologie....65
3.8.2 Statique....68
3.8.3 Dynamique....69
3.9 Analyse d'équité....73
3.9.1 Équité horizontale....74
3.9.2 Équité verticale....75
CHAPITRE 4 RESULTATS....79
4.1 Accessibilité totale mesurée....79
4.2 Distribution de l'accessibilité....81
4.2.1 Coefficient de corrélation de Spearman....82
4.2.2 Coefficient de variation....88
4.3 Analyse d'équité....94
4.3.1 Équité horizontale....94
4.3.2 Équité verticale....98
CHAPITRE 5 CONCLUSION....106
5.1 Limites....109
5.2 Perspectives de recherche....110
RÉFÉRENCES....112
ANNEXES....122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Cadres d'études statiques-dynamiques 30

Tableau 3-2 : Variables des mesures d'accessibilité 31

Tableau 3-3 : Résumé des données 32

Tableau 3-4 : Récapitulatif des études d'accessibilité 34

Tableau 3-5 : Cadres d'étude statiques-dynamiques 43

Tableau 3-6 : Variables des mesures d'accessibilité 45

Tableau 3-7 : Catégories d'extraction OSM des commerces 60

Tableau 3-8 : Superficie attribuée aux commerces par catégorie 60

Tableau 4-1 : Légende pour les figures d'accessibilité totale mesurée 79

Tableau 4-2 : Coefficients de corrélation de Spearman moyens entre cadres SD 83

Tableau 4-3 : Légende pour les coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les cadres SD 84

Tableau 4-4 : Coefficients de corrélation de Spearman moyens entre les mesures d'accessibilité 86

Tableau 4-5 : Légende pour les coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les mesures d'accessibilité 87

Tableau 4-6 : Coefficients de variation individuels moyens au cours d'une journée 88

Tableau 4-7 : Légende pour les coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des cadres SD 89

Tableau 4-8 : Légende pour les coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des mesures 91

Tableau 4-9 : Coefficients de variation temporels moyens sur les individus 93

Tableau 4-10 : Légende pour les coefficients de Gini temporels : comparaison des cadres SD 95

Tableau 4-11 : Légende pour les coefficients de Gini temporels : comparaison des mesures d'accessibilité 97

Tableau 4-12 : Légende pour les diagnostics d'équité verticale : Approche médiane 99

Tableau 4-13 : Légende pour les diagnostics d'équité verticale : Première approche suffisantiste 102

Tableau 4-14 : Diagnostic d'équité verticale : Deuxième approche suffisantiste 104

Tableau 4-15 : Diagnostic d'équité verticale : Troisième approche suffisantiste 104

Tableau 4-16 : Diagnostic d'équité verticale : Troisième approche suffisantiste avec seuil maximal 104

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Courbe de Lorenz et indice de Gini (inspiré de Lucas et al., 2016) 25

Figure 2-2 : Relation entre le transport et l'exclusion sociale (traduit de Lucas, 2012) 27

Figure 3-1 : Territoire d'étude 35

Figure 3-2: Commerces extraits d'OpenStreetMap 39

Figure 3-3 : Organisation relationnelle des données GTFS (traduit de Fortin et al., 2016) 40

Figure 3-4 : Réseaux de transport collectif de la STM, de la STL et du RTL 41

Figure 3-5 : Exemple numérique du biais de distance relative de la mesure 2SFCA (traduit de Tao et al., 2020) 47

Figure 3-6 : Origines des mesures d'accessibilité 49

Figure 3-7 : Fonction gaussienne avec un seuil temporel de 25 minutes 50

Figure 3-8 : Surface accessible en 30 minutes en transport en commun d'un point quelconque de l'Île de Montréal 52

Figure 3-9 : Trajet en transport en commun de deux points quelconques de l'Île de Montréal 52

Figure 3-10 : Indicateurs et chemin d'un trajet en transport en commun entre deux points quelconques de l'Île de Montréal 53

Figure 3-11 : Zone d'accessibilité en 30 minutes à partir d'un point quelconque à 9 :00 56

Figure 3-12 : Zone d'accessibilité en 30 minutes à partir du même point à 9 :10 57

Figure 3-13 : Opportunités sur l'île de Montréal 59

Figure 3-14 : Commerces accessibles à 7 :00 63

Figure 3-15 : Commerces accessibles à 13 :00 63

Figure 3-16 : Commerces accessibles à 22 :00 64

Figure 3-17 : Superficie totale disponible de commerces au cours de la journée 65

Figure 3-18 : Séparation du territoire selon les limites physiques 66

Figure 3-19 : Diagrammes de Voronoï sur les quatre territoires d'étude 67

Figure 3-20 : Densité de population de nuit 69

Figure 3-21 : Méthodologie de localisation de la population de jour (inspirée de Mageau-Béland, 2019) 70

Figure 3-22 : Densité de population de jour à 7 :00 71

Figure 3-23 : Densité de population de jour à 10 :00 72

Figure 3-24 : Densité de population de jour à 19 :00 72

Figure 3-25 : Profil d'accumulation de personnes à travers un jour moyen de semaine (source : OD 2018) 73

Figure 3-26 : Courbe de Lorenz 74

Figure 4-1 : Accessibilité totale mesurée 80

Figure 4-2 : Coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les cadres SD 84

Figure 4-3 : Coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les mesures d'accessibilité 87

Figure 4-4 : Coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des cadres SD 90

Figure 4-5 : Coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des mesures 92

Figure 4-6 : Coefficients de Gini temporels : comparaison des cadres SD 95

Figure 4-7 : Coefficients de Gini temporels : comparaison des mesures d'accessibilité 97

Figure 4-8 : Diagnostic d'équité verticale temporel : Approche médiane 100

Figure 4-9 : Diagnostic d'équité verticale temporel : Première approche suffisantiste 102

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

2SFCA	2-Steps Floating Catchment Area
M2SFCA	Modified 2-Steps Floating Catchment Area
Mesure OC	Mesure Opportunités Cumulées
GTFS	General Transit Feed Specification
Enquête OD	Enquête Origine-Destination
Cadre SD	Cadre Statique-Dynamique
OSM	OpenStreetMap
AD	Aire de Diffusion

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A Choix de la fonction de friction 122

ANNEXE B Attribution de poids aux commerces..... 132

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Cette première partie a pour objectif d'introduire la présente recherche en présentant successivement son contexte et sa problématique, ses objectifs ainsi que sa structure.

1.1 Problématique

Les mesures d'accessibilité peuvent être utilisées par les planificateurs, les ingénieurs ou les responsables politiques pour analyser l'efficacité des réseaux de transport, analyser les stratégies d'utilisation du sol ou encore mesurer l'équité spatiale et sociale. Elles sont reconnues comme étant des outils pertinents pour promouvoir des systèmes de transport équitables et durables, ainsi que pour favoriser l'inclusion sociale des groupes vulnérables.

L'accessibilité a largement été définie comme un ensemble de quatre composantes : l'utilisation du sol, le transport, les individus et le temps. Cependant, les mesures les plus populaires dans la littérature et les plus utilisées en pratique sont les mesures basées sur la localisation. Ces mesures intègrent très bien l'utilisation du sol et les transports mais la considération du temps, à différentes échelles, et des individus est plus rare. Les mesures basées sur l'individu répondent à ce besoin d'intégration des caractéristiques individuelles dans la mesure, mais elles sont plus difficiles à opérationnaliser et sont peu utilisées dans la pratique.

Au cours des dernières années, des progrès ont été faits sur l'intégration du temps dans les mesures d'accessibilité en transport collectif. Ces progrès ont été rendu possibles notamment grâce à la démocratisation des données GTFS (General Transit Feed Specification). Cependant, l'intégration du temps dans les mesures se limite encore pour la majorité à l'inclusion des variations des temps de trajets, en négligeant les variations temporelles des autres composantes de l'accessibilité. La disponibilité des opportunités varie au cours du temps (par exemple les commerces ouvrent et ferment au cours d'une journée) mais ces dynamiques sont généralement ignorées, alors qu'elles influent sur le niveau d'accessibilité des individus. De même les individus se déplacent au cours de la journée et la localisation des personnes influe sur leur niveau d'accessibilité, mais ces mouvements sont rarement pris en compte dans les mesures d'accessibilité. Cela est en partie dû à la nature des mesures basées sur la localisation et à la difficulté de suivre les individus dans le temps.

Quelques études ont proposé d'étudier l'impact de l'intégration de ces dynamiques urbaines sur les mesures d'accessibilité. Jarv et al. (2018) intègrent les dynamiques de ces trois composantes (le transport, les opportunités et les individus) sur une mesure d'accessibilité basée sur la localisation (la mesure par plus court chemin) ou encore Boisjoly et El-Geneidy (2016), qui se limitent à l'intégration des temps de trajet dynamiques et des emplois accessibles. Jarv et al. (2018) proposent ainsi une méthode qui intègre la population dynamique à sa mesure basée sur la localisation pour se rapprocher d'une mesure basée sur l'individu, mais en conservant les avantages de la mesure choisie.

Alors que les scientifiques prônent des mesures d'accessibilité adaptées à l'étude et que les données et les méthodes de mesures d'accessibilité dynamiques (mesures intégrant des variations temporelles) se développent, l'impact de l'intégration ou non des dynamiques des transports, des opportunités et des individus sur les mesures d'accessibilité est très peu étudiée. Les deux études présentées précédemment se limitent à mener des comparaisons sur une seule mesure d'accessibilité et seulement l'une des deux considère les mouvements de population. De plus, les mesures d'accessibilité sont couramment la base de diagnostics d'équité en transport. Cet aspect est partiellement traité par Jarv et al. (2018) qui s'intéressent uniquement à l'équité horizontale, par l'indice de Gini.

1.2 Objectifs de la recherche

Cette recherche propose d'étudier l'impact de l'intégration des dynamiques urbaines sur différentes mesures d'accessibilité, et sur des diagnostics d'équité en découlant. Cela se décompose en différents objectifs :

- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur différentes mesures d'accessibilité

Comme mentionné précédemment, le transport, les opportunités et les individus sont dynamiques et leurs propriétés évoluent au cours du temps. De plus les métriques de l'accessibilité sont nombreuses, notamment pour mesurer l'accessibilité basée sur la localisation. Jarv et al. (2018) ont proposé une méthode d'intégration dynamique de la population pour se rapprocher d'une méthode basée sur l'individu. L'objectif ici est également d'étendre cette méthode à d'autres métriques de l'accessibilité. Cet objectif est décomposable en deux sous-objectifs. Le premier est de regarder

comment se comportent différentes métriques lors de la dynamisation des paramètres et le second est d'étudier les différences entre mesures selon les paramètres considérés dynamiques.

- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur des diagnostics d'équité

Les mesures d'accessibilité sont très utilisées dans les diagnostics d'équité en transport, et si une mesure d'accessibilité est affectée par l'intégration dynamique des paramètres urbains alors les diagnostics d'équité qui en découlent peuvent l'être également. Puisque différents types de diagnostics d'équité existent, cet objectif se décompose en deux sous-objectifs. Le premier est l'étude des diagnostics d'équité horizontale et le second est l'étude des diagnostics d'équité verticale. Sachant que la population est parfois considérée dynamique, l'étude verticale de l'équité génère un défi majeur qui est de désagréger les mesures d'équité au niveau de l'individu.

- Proposer une méthode d'évaluation d'équité verticale qui intègre dynamiquement le concept suffisantiste

Cet objectif est né au fur et à mesure de la recherche et découle directement du second. Il regroupe différentes questions qui apparaissent lorsque le concept suffisantiste est étudié dynamiquement. Le suffisantisme est un principe d'équité qui prône l'accès à un niveau de ressources minimum (suffisant) pour tous les individus, leur permettant de satisfaire leurs besoins. Cependant, différentes questions se posent : est-ce que le seuil minimum de ressources est un seuil qui doit être atteint à chaque instant de la journée ? Est-il variable ? Est-ce qu'il doit être atteint au moins une fois dans la journée ou sur une partie de la journée ? Est-ce que les ressources se cumulent dans le temps et le total doit dépasser un seuil ?

1.3 Structure du mémoire

Le présent mémoire est organisé en cinq chapitres, dont le premier était l'introduction avec notamment la problématique et les différents objectifs de l'étude.

Le second chapitre est la revue de littérature qui porte en grande partie sur la conceptualisation et l'opérationnalisation de l'accessibilité et de l'équité. Ces deux sujets sont centraux au présent mémoire et présentent une pluralité de définitions et d'utilisations. Ce chapitre tente de présenter une revue exhaustive de ces concepts, avec un focus sur l'accessibilité dynamique et sur les évaluations d'équité basées sur l'accessibilité.

Le troisième chapitre est consacrée à la méthodologie mise en place pour répondre aux objectifs présentés précédemment. Les principaux points abordés sont les suivants : le contexte de l'étude, les données utilisées et leurs traitements, les définitions statiques et dynamiques des composantes urbaines et les cadres d'étude associés, les métriques de l'accessibilité utilisées et enfin les méthodes d'évaluation de l'équité mises en place.

Le quatrième chapitre présente les résultats, il est séparé en deux grandes parties : la première se consacre aux mesures d'accessibilité et la seconde aux diagnostics d'équité.

Enfin, le cinquième chapitre présente les conclusions et recommandations du mémoire. Cette partie vise à faire la synthèse de la méthode et des résultats obtenus, et à présenter les limites et les perspectives associées à l'étude.

CHAPITRE 2 REVUE LITTERAIRE

La revue de littérature est organisée en trois parties. La première partie se concentre sur l'accessibilité, ses définitions, ses mesures et son caractère dynamique. La deuxième définit le concept d'équité et les différents principes de justice distributive, ainsi que les méthodes d'évaluation d'équité en transport. Enfin la dernière partie est une synthèse de la revue littéraire, présentant les limites identifiées et introduisant les contributions de la présente recherche.

2.1 Accessibilité

Cette première partie de la revue de littérature présente l'accessibilité, qui est le sujet central de ce mémoire. L'accessibilité a beaucoup été étudiée, ainsi cette partie tente d'en saisir les différentes dimensions.

2.1.1 Définition

La première définition de l'accessibilité fut donnée par Hansen (1959) comme le potentiel d'interaction avec des opportunités et cette notion de potentiel d'interaction pour un individu a largement été reprise ensuite (Preston et Rajé, 2007; Boisjoly et El-Geneidy, 2016). Au fil des années les définitions de l'accessibilité se sont multipliées et ont peu à peu intégré de nouvelles composantes. Pour le Bureau of Transportation Statistics (1997), l'accessibilité est la facilité avec laquelle différents lieux comme le travail, les commerces et les centres de soins peuvent être atteints à partir d'un lieu. L'accessibilité vue comme une entité mesurable à partir d'un lieu est un gros sujet de la littérature regroupé sous le nom d'« accessibilité basée sur la localisation », présenté dans un prochain chapitre (à l'opposé de l' « accessibilité basée sur la personne » et d'autres types de mesures). Le transport est également une notion importante de l'accessibilité, puisqu'il constitue le moyen d'accéder aux opportunités. Dalvi et Martin (1976) définissent l'accessibilité comme la facilité d'accéder à une activité à partir d'un lieu et d'un mode de transport et d'autres reprennent cette définition en intégrant la notion d'heure de départ. Le transport est généralement intégré à l'accessibilité moyennant un coût de déplacement, qui est le sujet d'un prochain chapitre. Ce coût se retrouve dans la définition de l'accessibilité de Caulfield et al. (2014) étant la capacité à atteindre des biens, des services et des activités à un coût raisonnable, en un temps donné et moyennant un effort acceptable. La notion d'heure de départ est également un grand sujet des mesures d'accessibilité, qui sera présentée ensuite sous la notion d'accessibilité dynamique. Finalement,

toutes ces notions sont intégrées à la définition de Geurs et Van Wee (2004) qui identifient quatre composantes interactives de l'accessibilité : l'occupation du sol, le système de transport, le temps et l'individu. L'occupation du sol correspond aux différentes opportunités (quantité, qualité et distribution spatiale), à la demande pour ces opportunités et à la confrontation entre ces deux aspects. Le système de transport correspond au moyen de transport utilisé pour lier l'offre et la demande, en incluant ses différents aspects : prix, temps, confort, etc. La composante temporelle correspond à la contrainte induite par le temps : disponibilité des opportunités à différents moments et temps disponibles pour l'individu. Enfin, la composante individuelle reflète les besoins de chacun (selon l'âge, le revenu, l'éducation, etc.), ses capacités (condition physique ou disponibilité des modes de transport, par exemple) et ses opportunités (revenu, budget pour le transport, etc.). Cette composante est importante car les capacités et préférences de chacun peuvent impacter son niveau d'accessibilité (Cervero, Rood, et Appleyard, 1995; Geurs & Van Wee, 2004). Lucas (2012) suggère l'ajout d'une cinquième composante relative à l'exclusion sociale par le transport, qui est la capacité des personnes à interagir avec le système de transport, en tenant compte des besoins spécifiques des personnes vulnérables. Dans le même ordre d'idées, Khan (1992) avait décrit l'accessibilité comme étant multidimensionnelle et la définit quatre dimensions : l'accessibilité spatiale, la disponibilité, l'accessibilité financière et l'accessibilité socioculturelle. L'accessibilité spatiale correspond à la distribution spatiale des opportunités par rapport à la population, la disponibilité correspond à la quantité et aux types d'opportunités présentes selon les besoins de la population, l'accessibilité financière correspond aux coûts des services et enfin l'accessibilité socioculturelle correspond à l'adaptation des services aux différences sociales. Finalement, ces quatre dimensions sont incluses dans la définition à quatre composantes de Geurs et Van Wee (2004).

2.1.2 Pourquoi mesurer l'accessibilité ?

L'accessibilité est définie comme l'interaction de quatre composantes (Geurs et Van Wee, 2004) qui sont : l'utilisation du sol, le système de transport, le temps et l'individu. Ainsi, les mesures d'accessibilité sont couramment utilisées pour des diagnostics ou des planifications relatives à l'une ou à plusieurs de ces composantes. L'accessibilité est de plus en plus intégrée aux objectifs de planification de l'utilisation du sol et des transports (Boisjoly et al., 2016) et de diagnostic d'équité sociale ou spatiale (Jarv et al., 2018). L'accessibilité s'avère être un concept clef et un

outil pertinent pour promouvoir des systèmes de transport équitables et durables, ainsi que l'inclusion sociale des groupes vulnérables.

2.1.3 Mesures d'accessibilité

La définition de l'accessibilité de Geurs et Van Wee (2004) comme l'interaction de quatre composantes (utilisation du sol, système de transport, temps et individu) a largement été reprise et s'impose comme un pilier de la réflexion sur l'accessibilité. Si comprendre cette définition est assez simple, l'opérationnaliser est plus complexe. Or cette opérationnalisation, qui est nommée « mesure », est déterminante dans les différents processus qui l'intègrent (comme la planification par exemple). Différentes études mettent en avant le fait qu'une mesure d'accessibilité doit être définie selon le but poursuivi comme Bertolini et al. (2005) qui soutiennent qu'une mesure d'accessibilité doit être compréhensible par les personnes impliquées dans le processus de décision et doit être en adéquation avec les perceptions des populations concernées. Par exemple, une étude d'accessibilité qui intègre des seuils maximums de temps de trajets doit s'assurer qu'ils reflètent correctement une limite d'accès aux opportunités considérées. De même, une mesure d'accessibilité qui considère les individus en concurrence pour une opportunité, ou encore qui intègre leurs déplacements au cours du temps, doit s'assurer que ces hypothèses sont cohérentes avec l'étude menée. De manière générale, chaque mesure d'accessibilité se distingue par les hypothèses faites sur les comportements des individus mais la réflexion sur leur pertinence n'est pas toujours menée. Certaines de ces remarques sont reprises par la suite, notamment dans la partie 2.1.4.5 qui traite des coûts des trajets qui peuvent inclure les perceptions des individus. Dans le même ordre d'idées, diverses études (Geurs et Van Wee, 2004; Paez et al., 2012; Boisjoly et El-Geneidy, 2016) soutiennent qu'une mesure appropriée doit être intuitive, facile à interpréter et communicable.

Dans l'idéal, une mesure d'accessibilité intègre les quatre (ou cinq) composantes identifiées par Geurs et Van Wee (2004) et Lucas (2012). Cependant, pour des raisons méthodologiques et pour que la mesure soit adaptée à l'étude, interprétable et communicable, des choix sont faits et les composantes sont rarement toutes considérées : les composantes les plus couramment incluses dans les mesures d'accessibilité sont l'utilisation du sol et le système de transport.

Les mesures d'accessibilité peuvent se distinguer selon le cadre méthodologique qu'elles emploient et quelques auteurs ont défini des types de mesures. Une première classification suggère que

l'accessibilité peut être définie selon deux dimensions (Guagliardo 2004; Luo et Wang 2003; Khan 1992) : réelle ou potentielle et spatiale ou aspatiale. L'accessibilité réelle correspond à l'utilisation effective des services tandis que l'accessibilité potentielle correspond à leur probable utilisation. L'accessibilité spatiale correspond à une friction entre l'offre et la demande basée sur la séparation physique tandis que l'accessibilité aspatiale correspond à une friction basée sur des caractéristiques non géographiques. Ces deux dimensions renvoient à d'autres concepts qui existent dans la littérature. Premièrement, l'accessibilité réelle et potentielle renvoie à l'accessibilité positive et normative définie par Paez et al. (2012) et présentée dans la partie 2.1.4.5. De plus, l'accessibilité spatiale et aspatiale renvoie aux concepts d'accessibilité basée sur la localisation et d'accessibilité basée sur la personne. Finalement, Geurs et Van Wee (2004) ont défini quatre catégories de mesures d'accessibilité : mesures basées sur l'infrastructure, mesures basées sur la localisation, mesures basées sur l'individu et mesures basées sur l'utilité.

Mesures basées sur l'infrastructure

Les mesures basées sur l'infrastructure renvoient à la mesure du niveau de service ou du niveau de performance d'un système de transport. La performance renvoie par exemple à la congestion d'un réseau routier ou à la vitesse et à la fréquence d'un service de transport collectif. Ce modèle intègre uniquement la composante « système de transport » et est très peu compatible avec les trois autres.

Ce groupe de mesure se retrouve dans d'autres études sous différents noms. Il se réfère au modèle de séparation physique (Bhat et al., 2000), aux mesures d'« accessibilité au système » (Lei et Church, 2010; Malekzadeh et Chung, 2020) ou aux mesures d'accessibilité « au » transport collectif (et non « en » transport collectif) (Boisjoly et El-Geneidy, 2016; Moniruzzaman et Páez, 2012). En effet, différentes études catégorisent les mesures d'accessibilité relatives au transport collectif. Murray et Wu (2003) ou Moniruzzaman et Páez (2012) séparent ces mesures en deux groupes : les mesures au transport collectif et les mesures en transport collectif. Les premières réfèrent à l'accessibilité à pied aux arrêts de transport en commun tandis que la deuxième correspond à l'accessibilité à diverses opportunités via le transport en commun. Fransen et al. (2015) ont défini quatre types de mesures d'accessibilité relatives au transport collectif, qui sont des sous-groupes des deux définis précédemment. Le premier type mesure l'accessibilité physique en termes de proximité en temps ou distance, aux arrêts de transport collectif. Le deuxième type de mesure intègre l'intensité ou la fréquence du service de transport collectif et le troisième type de

mesure ajoute les coûts de trajet aux opportunités. Enfin le dernier, considère les variations de service au cours du temps. Deux autres groupes de mesures d'accessibilité en transport collectif sont présentent dans la littérature (Lei et Church, 2010; Malekzadeh et Chung, 2020) : l'accessibilité facilitée par le système de transport (system facilated accessibility) et l'accessibilité intégrale. La première mesure le coût de trajet (souvent le temps de trajet) pour accéder à une opportunité tandis que la seconde mesure l'accès total à un ensemble d'opportunités. Cette dernière s'inclut dans le type « mesures basées sur la localisation » qui est le sujet de la prochaine partie.

Mesures basées sur la localisation

Ce deuxième type de mesures identifiées par Geurs et Van Wee (2004) sont les mesures basées sur la localisation. Comme indiqué précédemment, ces mesures se retrouvent également sous le nom de mesures d'accessibilité spatiales (Apparicio et al., 2017) et s'opposent aux mesures dites aspatiales. Les mesures d'accessibilité basées sur la localisation mesurent l'accessibilité à des opportunités distribuées dans l'espace depuis différentes origines et sont généralement employées à un niveau macroscopique. Ces mesures dont l'utilisation est croissante (Apparicio et al., 2017) sont les plus populaires chez les preneurs de décisions (Dodson et al., 2007) et de nombreuses études vantent les bénéfices de cette mesure en planification. En effet ces mesures permettent une évaluation relative de l'accessibilité entre différentes zones, différents groupes de personnes et différents modes, à un niveau assez agrégé pour servir de guide aux planificateurs (Owen et Levinson, 2015). Cela permet notamment aux planificateurs d'évaluer la distribution spatiale des opportunités et la qualité des services de transport (Handy et Niemeier,1997) ou de mesurer l'impact d'un projet (relatif au transport ou à l'utilisation du sol), et d'évaluer qui en sont les gagnants ou perdants en termes d'accessibilité (Cerdà et El-Geneidy, 2010).

Pour mesurer l'accessibilité spatiale, de nombreuses métriques ont été développées au cours du temps dont la première et la plus répandue est la métrique d'opportunités cumulées formulée pour la première fois par Hansen en 1959. Ces métriques sont nombreuses et en évolution, elles sont présentées dans la partie 2.1.4.

Parmi les quatre composantes de l'accessibilité données par Geurs et Van Wee (2004), les mesures basées sur la localisation intègrent correctement l'utilisation du sol et les systèmes de transport (notamment grâce aux données GTFS). Cependant, les composantes temps et individus sont moins intégrées. L'accessibilité relative entre différents segments de population est souvent mesurée mais

les caractéristiques socio-économiques des populations ne sont pas directement intégrées dans la mesure. Certaines études (El-Geneidy et al., 2016; Giannotti et al., 2022) proposent de considérer certains attributs relatifs aux personnes dans le coût du trajet (qui représente l'effort global pour accéder à une opportunité depuis une origine) mais généralement le temps de trajet est la seule variable représentant la friction entre les origines et les destinations. Paez et al. (2012) proposent d'intégrer les comportements des individus dans la fonction de friction (fonction pondérant le temps de trajet), en différenciant l'accessibilité positive de l'accessibilité normative. La partie 2.1.4.5 traite en détail ce coût de trajet. La composante temporelle est quant à elle de plus en plus intégrée et étudiée avec l'émergence des mesures d'accessibilité dites dynamiques, qui s'appuient notamment sur la croissance de la disponibilité des données GTFS. Cependant, la composante temporelle est généralement intégrée à la composante transport et les opportunités et les individus sont considérés statiques. Ce sujet est central au présent mémoire et est traité plus en détail dans la partie 2.1.5.

Mesures basées sur la personne

Les mesures basées sur l'individu analysent l'accessibilité à l'échelle de l'individu, de la façon la plus désagrégée possible, en mesurant les activités auxquelles un individu peut participer en un temps donné (Geurs et Van Wee, 2004). Ces mesures sont apparues avec Hägerstrand (1970) qui a défini le modèle « prisme espace-temps », pour répondre aux limitations des mesures basées sur la localisation qui négligent les capacités variables des individus et ne tiennent pas compte des déplacements des individus. Cette approche considère que l'accessibilité est dépendante de la mobilité de chacun et est limitée par les contraintes temporelles (Lei et Church, 2010). Les contraintes temporelles sont au nombre de trois (Scheurer et al, 2007) : contrainte de capacité, de jumelage et d'autorité. La première renvoie à la capacité limitée des individus de prendre part à des activités dans un laps de temps restreint, la deuxième renvoie à la nécessité des individus d'être à certains endroits à certains moments et la dernière renvoie à la disponibilité des opportunités dans le temps, qui varie selon le jour et l'activité. C'est en combinant ces contraintes temporelles aux attributs personnels que le prisme espace-temps se dessine et définit les activités auxquelles l'individu peut prendre part (El-Geneidy et Cerdà, 2010; Hägerstrand, 1970).

Dans leur étude, Geurs et Van Wee (2004) définissent cinq indicateurs de comparaison de mesures d'accessibilité : les bases théoriques, l'opérationnalisation, l'interprétabilité et la communicabilité,

l'accessibilité comme indicateur social et l'accessibilité comme indicateur économique. Finalement, les mesures basées sur la localisation se distinguent par leur rigueur théorique et sont considérées comme étant les plus aptes à traiter d'équité (Di Ciommo et Shiftan, 2017). Elles se distinguent également statistiquement des mesures basées sur la localisation, qui sont très corrélées entre elles (Kwan, 1998).

Cependant, les mesures basées sur la personne sont peu utilisées en pratique et bien moins populaires que les mesures basées sur la localisation. Cela s'explique par leur grande complexité au niveau horaire et au niveau des individus. La précision de ces mesures demande une grande quantité de données (pas nécessairement disponibles) et entraine de longs temps de calculs. De plus, à la lumière des critères de Geurs et Van Wee (2004), ces mesures sont considérées comme difficilement communicables et interprétables. Tout cela rend les modèles basés sur l'individu peu opérationnalisables à grande échelle.

Finalement, ces mesures sont celles qui intègrent le mieux la composante temporelle et individuelle de l'accessibilité, qui sont les composantes négligées par les mesures basées sur la localisation. Dans ce sens, Jarv et al. (2018) ont développé un modèle basé sur la localisation qui se rapproche d'un modèle basé sur l'individu. Pour cela, ils calculent l'accessibilité depuis un nombre d'origines fixe et désagrègent les résultats sur la population selon leurs positions au cours du temps, grâce à des données GPS.

Mesures basées sur l'utilité

Les mesures basées sur l'utilité étudient les bénéfices économiques que tirent les individus des activités distribuées dans l'espace. Elles trouvent leurs origines dans des études économiques (Geurs et Van Wee, 2004). En effet, la notion micro-économique d'utilité renvoie au bénéfice que tire un individu d'une ressource (Di Ciommo et Shiftan, 2017). Ce principe voit les individus comme des consommateurs rationnels qui choisissent l'alternative qui maximise leur utilité (Lei et Church, 2010). Koenig (1980) définit l'utilité d'un individu t qui visite l'opportunité j depuis une origine i comme étant égale à :

$$U_{ij}^{t} = V^{t} - C_{ij}^{t} \qquad (1)$$

Où V^t est l'utilité aléatoire brute et C_{ij}^t le coût de trajet généralisé. En utilisant des modèles de types logit, Koenig a montré que l'utilité maximale est en moyenne égale à $U_i = \log(A_i)$ où A_i est l'accessibilité calculée avec un modèle basé sur la localisation, depuis un point i.

Ce modèle présente de nombreuses qualités. Basé sur des notions économiques et des comportements de mobilité, il est le modèle qui valide le mieux le critère théorique (El-Geneidy et Cerdà, 2010). De plus, Geurs et Van Wee (2004) considèrent ce modèle prometteur pour le développement équitable des transports, et ses bases économiques facilitent son intégration à divers projets. Cependant, ce modèle est le plus complexe mathématiquement et demande une grande quantité de données (El-Geneidy et Cerdà, 2010). Relativement aux critères de Geurs et Van Wee (2004), ce modèle est peu communicable et interprétable. Ainsi, ce modèle est peu employé dans la pratique.

2.1.4 Métriques de l'accessibilité spatiale

Les modèles les plus populaires sont les modèles basés sur la localisation, et il existe différentes métriques pour mesurer l'accessibilité d'une telle manière. Dans cette partie, les métriques présentées sont les suivantes : mesure d'opportunités cumulées, mesure gravitaire, mesure par zone de captage en deux étapes (2SFCA) et mesure du temps de trajet. Ces mesures sont souvent citées comme les plus populaires (Zhang et al., 2022; Apparicio et al., 2017), et les trois premières sont utilisées pour le présent mémoire.

Apparicio et al. (2017) donnent également quatre paramètres à définir pour mesurer l'accessibilité spatiale : l'unité spatiale de référence, la méthode d'agrégation, la mesure et le type de distance. L'unité spatiale de référence renvoie à l'entité spatiale pour laquelle l'accessibilité sera mesurée et cartographiée. L'aire de diffusion et le secteur de recensement sont les plus populaire mais certaines études comme Senegas et al. (2023) mesurent l'accessibilité au niveau du bâtiment, qui semble être l'unité la plus fine possible (mais demande beaucoup de données et génère de grand temps de calculs). La méthode d'agrégation renvoie au choix d'un point d'agrégation, qui est le point géographique utilisé pour représenter l'unité spatiale de référence et en mesurer l'accessibilité. La méthode la plus utilisée est le centroïde qui peut être pondéré selon différents paramètres. Luo et Wang (2003) utilisent le centroïde des secteurs de recensement pondéré par la population. La mesure renvoie à ce qui est appelé ici métrique et enfin le type de distance correspond à la méthode utilisée pour calculer la distance entre l'origine et l'opportunité (distance

euclidienne, de Manhattan ou distance réseau). En réalité, cette distance est une des méthodes utilisées pour définir le coût du trajet entre une origine et une opportunité.

2.1.4.1 Opportunités cumulées

La mesures d'opportunités cumulées est mesure simple d'accessibilité qui compte le nombre d'opportunités accessibles depuis une origine, en un temps ou une distance définie au préalable (Geurs and van Wee, 2004; Vickerman, 1974). Cette mesure est la plus simple et emploie seulement une fonction de pondération binaire (Ingram, 1971 ; Klar et al. 2023). Paez et al. (2012) définissent une formulation générale pour les mesures d'opportunités cumulées et les mesures gravitaires, qui est la suivante :

$$A_{ik}^{p} = \sum_j g(W_{jk}) f(c_{ij}^{p}) \qquad (2)$$

A_{ik}^{p} est l'accessibilité d'une personne p, depuis une origine i et à un ensemble d'opportunités de type k. W_{jk} est le nombre d'opportunités au point j, pondéré par la fonction g. c_{ij}^{p} est le coût du trajet entre le point i et le point j, selon le point de vue de la personne p, pondéré par la fonction de friction f (ou fonction d'impédance).

Pour la formule d'opportunités cumulées, la plus courante est donnée en équation (3) : le nombre d'opportunités est simplement compté et le temps de trajet ou la distance maximale c_0 est identique pour tous les individus. La fonction d'impédance est une fonction binaire ($f(c_{ij}) = 0$ si $c_{ij} > c_0$ et 1 sinon).

$$A_{ik} = \sum_j W_{jk} f(c_{ij}) \quad (3)$$

Cette mesure est couramment utilisée en planification urbaine puisqu'elle est simple à calculer et facilement interprétable. Son principal désavantage est qu'elle ne tient pas compte du temps de trajet ni de la perception qu'en ont les usagers pour pondérer les opportunités (Ben-Akiva et Lerman, 1979). De plus, le seuil temporel ou de distance est souvent un choix arbitraire du planificateur (Paez et al., 2012) et ne tient pas nécessairement compte de la réalité comportementale. Ce sujet est abordé en partie 2.1.4.5 qui traite des coûts du trajet.

2.1.4.2 Mesure gravitaire

La mesure gravitaire est apparue pour la première fois avec Hansen (1959) pour répondre aux enjeux de la mesure d'opportunités cumulées. Il propose cette mesure où les opportunités sont

pondérées par une fonction gravitaire du coût de trajet, puis sommées (Owen et Levinson, 2015). La première formulation de Hansen était la suivante :

$$A_i = \sum_j W_j d_{ij}^{-\beta} \qquad (4)$$

A_i est l'accessibilité à une origine i et W_j est le nombre d'opportunités au point j, d_{ij} est la distance entre i et j et β est le facteur selon lequel l'accessibilité décroit quand la distance augmente.

La mesure a évolué et suit généralement la formulation de Paez et al. (2012) donnée en équation (2), avec différentes fonctions de friction et de nouvelles façons de compter le coût de trajet, même si la distance ou le temps de trajet entre l'origine et la destination sont les plus courantes (Handy, 1994; Vickerman, 1974). Encore une fois, une future partie est consacrée aux coûts de trajet et aux fonctions d'impédance. Le principal désavantage de cette mesure est sa difficile communicabilité et interprétation (Owen et Levinson, 2015; Geurs et Van Wee; 2004). De plus, la mesure gravitaire est très corrélée à la mesure d'opportunités cumulées et celles-ci sont interchangeables si nécessaire (El-Geneidy et al., 2011). Le même constat est fait par Boisjoly et El-Geneidy (2016) qui ont comparé ces mesures en intégrant les paramètres urbains de façon dynamique.

2.1.4.3 Mesure 2SFCA

La méthode par zone de captage en deux étapes « two-step floating catchment area » (2SFCA) fut développée par Luo et Wang (2003) pour répondre aux enjeux des mesures précédentes qui ne considèrent les opportunités que du point de vue de l'offre et pas de la demande. Cette mesure intègre un coefficient en plus de la fonction d'impédance pour pondérer les opportunités selon les interactions entre l'offre et la demande. Les précédentes versions des mesures « floating catchment area » sont basées sur le déplacement d'une fenêtre dans la zone d'étude (Wang, 2000). Les opportunités dans la fenêtre sont comptées et représentent la densité au centre de cette dernière. Radke et Mu (2000) ont fait évoluer la méthode pour créer la « méthode par décomposition spatiale ». Cette méthode calcule le ratio d'opportunités par personne dans une fenêtre centrée sur les opportunités et somme ces ratios sur les populations présentes dans ces différentes fenêtres autour des opportunités. Luo et Wang (2003) se sont basés sur ces travaux pour finalement développer la méthode 2SFCA, dont les deux étapes sont données en équation (5) et (6).

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k \in \{d_{kj} \leq d_0\}} P_k} \qquad (5)$$

$$A_i = \sum_{j\in\{d_{ij}\leq d_0\}} R_j = \sum_{j\in\{d_{ij}\leq d_0\}} \frac{S_j}{\sum_{k\in\{d_{kj}\leq d_0\}} P_k} \quad (6)$$

La première étape est la pondération des opportunités en fonction de leur capacité et du nombre de personnes y ayant accès : R_j est le rapport entre la capacité S_j de l'opportunité et la population P_k à une distance maximale d_0 de l'opportunité. La deuxième étape calcule l'accessibilité aux origines i, en sommant les R_j des opportunités se trouvant à une distance de moins de d_0 de l'origine i.

Si les mesures 2SFCA sont d'abord développées pour mesurer des inégalités spatiales aux services de santé, elles sont ensuite reprises pour différents types d'études incluant l'accès aux emplois ou aux commerces alimentaires par exemple (Chen et Jia, 2019). Ainsi, dans les 20 dernières années, ces mesures ont connu de nombreuses améliorations qui peuvent être de trois types : relatives à la zone de captage, relatives à la compétition régionale ou relatives à la fonction d'impédance (Tao et Cheng, 2016). Toutes les améliorations listées ici sont extraites des travaux de Chen et Jia (2019). Premièrement, les améliorations relatives à la zone de captage font références au seuil d_0 qui fût d'abord défini de façon arbitraire. La version dynamique « D2SFCA » propose de faire varier d_0 selon la densité de population pour prendre en compte que les personnes dans des zones moins denses peuvent être prêtes à se déplacer plus loin pour certains besoins. A l'inverse, la version variable « V2SFCA » propose de faire varier le seuil selon les capacités variables des opportunités. Enfin, une méthode plus proche voisins modifiée (« nearest-neighboor modified », la terminologie francophone n'existe pas ou n'a pas été identifiée) (NN-M2SFCA) dit que chacun accède à un certain nombre d'opportunités qui sont les plus proche de l'origine et propose de faire varier d_0 de sorte à atteindre ce nombre. Deuxièmement, deux améliorations notables relatives à la compétition régionale sont identifiées. La première est la version en trois étapes « 3SFCA » qui ajoute une pondération des opportunités selon la probabilité de fréquentation (basée sur la distance) et la seconde est la version modifiée « M2SFCA » qui prend en compte qu'une opportunité peut être sous visitée par manque de demande dans son voisinage. Finalement, le dernier type d'amélioration est relatif à fonction d'impédance qui fut intégrée aux mesures 2SFCA (équations (7) et (8)). Comme pour les (5) et (6), R_j est le rapport entre la capacité S_j de l'opportunité et la population P_k à une distance maximale d_0 de l'opportunité et f est la fonction d'impédance. d_{ij} et d_{kj} réfèrent aux distances entre les individus et les opportunités.

$$R_j = \frac{S_j}{\sum_{k\in\{d_{kj}\leq d_0\}} P_k f(d_{kj})} \qquad (7)$$

$$A_i = \sum_{j\in\{d_{ij}\leq d_0\}} R_j f(d_{ij}) = \sum_{j\in\{d_{ij}\leq d_0\}} \frac{S_j f(d_{ij})}{\sum_{k\in\{d_{kj}\leq d_0\}} P_k f(d_{kj})} \qquad (8)$$

L'intégration de cette fonction d'impédance constitue l'amélioration principale. Le choix de cette fonction est un sujet plus large qui est traité dans une partie suivante, relative au coût du trajet.

2.1.4.4 Mesures duales

Les trois mesures présentées précédemment sont nommées « mesures primaires » et sont opposées aux mesures dites « duales », qui sont le sujet de cette partie. Cui et Levinson (2020) définissent les mesures primaires comme ces mesures issues de la première définition de Hansen (1959), qui comptent les opportunités en intégrant différentes pondérations. A l'inverse les mesures duales évaluent le coût de trajet nécessaire pour atteindre un nombre fixé d'opportunités. Ces mesures sont pertinentes dans les cas où le temps pour accéder à un service est plus critique que le nombre d'opportunités atteignables, mais elles restent peu utilisées (Cui et Levinson, 2020). Une utilisation répandue de mesure duale est l'évaluation du coût de trajet (en temps ou en distance) pour atteindre l'opportunité la plus proche (Jarv et al., 2018; Apparicio et al., 2007). Cui et Levinson (2020) suggèrent une utilisation plus répandue dans la pratique car ils évaluent que cette mesure présente les mêmes avantages que les autres mesures basées sur la localisation : elle est peu couteuse en données et basée sur la même matrice de temps de trajet. De plus, elle est simple à interpréter par les planificateurs et la population.

2.1.4.5 Coût du trajet

Le coût d'un trajet en transport se rapporte à l'effort que ce dernier demande, soit à ce que cela coute à l'individu, pas seulement économiquement mais en termes de temps ou d'effort physique par exemple. Ce terme renvoie à l'utilité ou la désutilité d'un trajet qui peut être utilisée en modélisation des comportements. Dans les mesures d'accessibilité, ce sujet est central. Paez et al. (2012) estiment que l'accessibilité est la combinaison du coût de trajet et de la distribution spatiale des opportunités, d'après l'équation générale suivante des mesures basées sur la localisation :

$$A_{ik}^{p} = \sum_j g(W_{jk}) f(c_{ij}^{p}) \qquad (9)$$

Où A_{ik}^{p} est l'accessibilité d'une personne p, depuis une origine i et à un ensemble d'opportunités de type k. W_{jk} est le nombre d'opportunités au point j, pondéré par la fonction g. c_{ij}^{p} est le coût du trajet entre le point i et le point j, selon le point de vue de la personne p, pondéré par la fonction de friction f (ou fonction d'impédance). Le coût de trajet est généralement défini comme le temps ou la distance du trajet de la personne (El-Geneidy et al., 2016) et les méthodes pour les estimer ont largement évolué. Apparicio et al. (2017) listent différents types de distances employées pour les mesures d'accessibilité : distance euclidienne, distance de Manhattan et distance réseaux. De même l'évaluation des temps de trajet a progressé, notamment en transport commun grâce au General Transit Feed Specification (GTFS) (Boisjoly et El-Geneidy, 2016). Ce coût de trajet peut également être implémenté comme le coût général de transport en ajoutant d'autres attributs relatifs au trajet (El-Geneidy et al., 2016 ; Wu et al., 2023). Ces deux dernières études citées définissent un coût de trajet généralisé basé sur le temps de trajet et sur les tarifs des trajets. Wu et al. (2023) décomposent également le temps de trajet en temps de marche, d'attente et en trajet. Le coût du trajet est intégré aux mesures d'accessibilité via une fonction de friction aussi appelée fonction d'impédance qui traduit la décroissance de l'accessibilité quand le coût de trajet augmente. Les fonctions utilisées sont diverses et résumées ensuite. Dans les prochaines définitions, c_0 représente un coût seuil, β et α sont des paramètres sans dimensions.

La fonction binaire est définie de la manière suivante :

$$f(c_{ij}) = \begin{cases} 1, c_{ij} \leq c_0 \\ 0, c_{ij} > c_0 \end{cases} \qquad (10)$$

Dans la littérature, une différence est faite entre la mesure d'opportunités cumulées rectangulaire (CUMR) qui est définie avec la fonction binaire et la mesure d'opportunités cumulées linéaire (CUML), aussi appelée mesure hybride entre la mesure d'opportunités cumulées et mesure gravitaire, et définie avec la fonction de friction affine suivante (Klar et al., 2023) :

$$f(c_{ij}) = \begin{cases} \frac{c_0 - c_{ij}}{c_0}, c_{ij} \leq c_0 \\ 0, c_{ij} > c_0 \end{cases} \qquad (11)$$

La fonction de puissance inverse est donnée par la formule suivante (Kwan, 1998) :

$$f(c_{ij}) = {c_{ij}}^{-\beta} \qquad (12)$$

La fonction exponentielle négative est définie par Klar et al. (2023) :

$$f(c_{ij}) = \exp(-\beta c_{ij}) \qquad (13)$$

La fonction Gaussienne modifiée est donnée par Klar et al. (2023) :

$$f(c_{ij}) = \exp\left(-\frac{{c_{ij}}^2}{\beta}\right) \qquad (14)$$

La fonction Log-Logistique est donnée par la formule suivante (Kapatsila et al., 2023) :

$$f(c_{ij}) = \frac{1}{1+\left(\frac{c_{ij}}{median(c)}\right)^{\beta}} \qquad (15)$$

Le paramétrage de celles-ci peut être fait selon une vision positive ou normative de l'accessibilité (Paez et al., 2012). La vision normative de l'accessibilité renvoie à une définition de la fonction d'impédance basée sur une définition arbitraire de ses paramètres, qui dépend de ce que l'analyste peut considérer comme raisonnable (en termes de coûts) ou sur une brève analyse des comportements de déplacements (mais fixée pour tout le monde). Dans cette idée, différentes études (Kwan, 1998 ; Klar et al., 2023 ; Chen et Jia, 2019) proposent un paramétrage de la fonction de friction selon la définition d'un seuil de coût pour lequel une valeur proche de 0 (choisie) est atteinte par la fonction. Selon les données disponibles, une autre méthode est le paramétrage selon une enquête de déplacements de la population (Kapatsila et al., 2023). La vision positive de l'accessibilité renvoie à une perception de l'accessibilité qui est propre à chacun. Par exemple, Paez et al. (2012) utilisent une fonction de friction binaire dont le seuil de coût évolue selon les caractéristiques socio-démographiques des populations (calculs de distances selon la méthode d'expansion (Casetti, 1972)). Dans le même ordre d'idées, Giannotti et al. (2022) définissent un coût de trajet relativement aux revenus. Finalement, la fonction et les paramètres choisis peuvent avoir un grand impact sur les résultats des mesures : la fonction et les paramètres doivent être définis proprement à chaque étude (Owen et Levinson, 2015).

2.1.5 Accessibilité dynamique

Le temps est l'une des quatre composantes de l'accessibilité de Geurs et Van Wee (2004), et est prédominant dans les mesures d'accessibilité basées sur l'individu (Miller, 2005). La méthode du prisme espace-temps (Hagerstrand, 1970) est un exemple d'intégration du temps dans les mesures basées sur la personne. Cependant ces facteurs temporels sont au contraire marginaux dans les

mesures d'accessibilité basées sur la localisation (Boisjoly et El-Geneidy, 2016). De la même façon, Jarv et al. (2018) estiment que le temps est intrinsèque à l'accessibilité mais qu'il est mal intégré aux mesures spatiales (Kwan, 2013). De nombreuses études soulignent les progrès qui ont été faits en termes de mesures d'accessibilité dynamiques et du nombre croissant d'études intégrant le temps (Guo et Brakewood, 2024; Tomasiello et al., 2019). Les mesures d'accessibilité dynamiques intègrent deux concepts clefs: la variabilité temporelle de l'accessibilité et la résolution temporelle des mesures (Stepniak et al., 2019; Zhang et al., 2022). La variabilité temporelle de l'accessibilité est sa fluctuation à travers le temps, alors que la résolution temporelle d'une mesure est la méthode choisie d'agrégation des temps de trajet en une ou plusieurs valeurs (pour représenter une ou plusieurs périodes). Par exemple, Boisjoly et al. (2016) mesurent l'accessibilité à six périodes de la journée, ce qui constitue la variabilité temporelle de l'accessibilité. Pour ce qui est de la résolution temporelle, lorsque la période étudiée dure plus d'une heure, ils utilisent la moyenne des temps de trajet mesurés à chaque heure. Dans le même ordre d'idée, Jarv et al. (2018) étudient l'accessibilité sur une périodes de 24 heures. La variabilité de l'accessibilité est sa fluctuation au cours de cette période, tandis que la méthode de résolution choisie est : cinq mesures de temps de trajets sont effectuées par heure, le temps de trajet le plus rapide représente l'heure. Stepniak et al. (2019) étudient l'impact du choix de la résolution temporelle sur les mesures d'accessibilité. Ils étudient quatre méthodes d'échantillonnage du temps (échantillon de temps de trajet mesurés sur une période, agrégés en une valeur), quatre scénarios de fréquence de transport collectif, trois types de mesures d'accessibilité et sept distributions des opportunités. Finalement, l'augmentation de la résolution temporelle est associée à une augmentation de la précision des mesures, mais elle devient négligeable passé les 5 minutes d'intervalle de mesures. Leur recommandation est un intervalle de mesure de 15 minutes qui permet une bonne précision en réduisant considérablement le nombre de calculs.

Malgré ces avancées, les mesures basées sur la localisation intègrent encore mal le temps à certaines composantes de l'accessibilité (Boisjoly et al., 2016; Jarv et al., 2018), ce qui peut conduire à des biais ou à des mauvaises conclusions sur les mesures (Tenkanen et al., 2016). En effet, le temps est l'une des quatre composantes de l'accessibilité mais interagit avec les trois autres : le système de transport, les opportunités et les individus (Zhang et al., 2022). Les systèmes de transport varient dans le temps : les axes routiers sont sujets à la congestion, les services de transport collectif ont des fréquences et itinéraires variables. Les opportunités dépendent également

du temps, par exemple les commerces présentent des horaires d'ouverture et de fermeture. Et enfin les individus présentent des contraintes qui évoluent dans le temps, selon leur activité ou localisation par exemple. La temporalité des systèmes de transport est la dynamique qui est largement la plus intégrée aux mesures d'accessibilité dynamiques notamment grâce à l'émergence des données le permettant. Tomasiello et al. (2019) désignent le traçage des véhicules, les données GTFS et Google API (pour certains modes) comme sources de données permettant ces avancés. L'augmentation de la disponibilité des données normalisées GTFS est la principale source de données permettant l'intégration des transports collectifs dynamiques (Stepniak et al., 2019; Wessel et Farber, 2019; Boisjoly et al., 2016). Wessel et Farber (2019) ont étudié la fiabilité de ces données programmées comparé aux passages réels des transports collectifs, et leur impact sur les mesures d'accessibilité. La méthode utilise un système de traçage des véhicules en temps réel. Finalement, dans les zones à faible intensité de passages de transports collectifs, les écarts sont très variables entre l'accessibilité réelle et l'accessibilité programmée, et ces écarts convergent vers 5% à 15% dans les zones à hautes fréquences (surestimation de l'accessibilité programmée).

Cependant, les dynamiques des opportunités sont très souvent négligées dans les mesures d'accessibilité, comme le soulignent Boisjoly et al. (2016) ou Widener et al. (2017), qui en étudient l'impact sur l'accessibilité aux emplois et aux commerces alimentaires. Boisjoly et al. (2016) concluent sur la haute corrélation des mesures statiques et dynamiques alors que Widener et al. (2017) trouvent que l'accessibilité dynamique chute fortement en soirée.

Les dynamiques des populations sont également négligées dans les mesures d'accessibilité basées sur la localisation. Au, contraire, ces dynamiques sont pleinement considérées dans les mesures basées sur l'individu, comme Widener et al. (2015) qui mesurent l'accessibilité à la nourriture saine en transport collectif, en utilisant le prisme espace-temps. Pour pallier cela, Jarv et al. (2018) proposent une méthode d'intégration des mouvements des individus dans les mesures basées sur la localisation, pour se rapprocher d'une mesure basée sur l'individu en gardant les avantages de la première. La méthode se base sur le suivi GPS des individus, qui se voient attribuer l'accessibilité de la zone (segmentation du territoire pour les mesures basées sur la localisation) dans laquelle ils se trouvent. Mageau-Béland (2019) réalise un suivi similaire de la population au cours de la journée mais en se basant sur les données d'une enquête de déplacement.

2.2 Équité

Une définition basique de l'équité est « la distribution des bénéfices et des coûts sur les membres d'une société » (Miller, 1999). A partir de cette définition, trois composants clefs de l'équité se distinguent : les bénéfices et les coûts qui sont distribués, les groupes de personnes sur lesquels sont distribués ces bénéfices et ces coûts, le principe de distribution défini comme étant socialement acceptable (Di Commo et Shiftan, 2017). Les différents principes de distribution, présentés dans la partie suivante, sont : l'égalitarisme, le suffisantisme, l'utilitarisme et le capacistisme. Contrairement à l'égalité qui renvoie à la répartition en proportion égale des ressources aux individus, l'équité intègre un jugement éthique dans le cadre de cette répartition (Van Wee et Geurs, 2011).

2.2.1 Principes de distribution

La présentation des principes de distribution qui suit s'appuie sur les travaux de Michaud (2019) et en résume les différentes notions.

2.2.1.1 Égalitarisme

La théorie égalitariste veut que la société traite chaque individu également (Sen, 1992). En termes de ressources, cela signifie que chaque personne doit disposer d'un nombre égal de ressources. Ainsi, le principe de distribution égalitariste vise à réduire ou combler les écarts de ressources entre les individus. La théorie d' « égalitarisme strict » propose de combler ces écarts par la redistribution des ressources existantes des plus favorisés vers les plus défavorisés (Meyer et Roser, 2009). Ce principe de distribution reprend les termes de Rawls (1971) qui argumente pour que les plus grands bénéfices soient au profit des personnes les plus défavorisées (principe max-min de Rawls (2001)). Ce principe concerne surtout l'État qui est garant de la justice sociale et qui peut adopter des politiques visant à réduire les inégalités (Pereira et al., 2017).

2.2.1.2 Suffisantisme

Contrairement à la théorie égalitariste qui s'intéresse aux différences entre les individus qu'il est souhaitable de combler, soit à un niveau relatif de ressources, la théorie suffisantiste s'intéresse à un niveau absolu de ressources, qui doit être au-dessus d'un certain seuil pour tous les individus. En effet, cette théorie considère que chacun doit posséder un niveau de ressources suffisant pour satisfaire ses besoins primaires et garantir son bien-être (Lucas et al., 2016). La théorie suffisantiste

dite « faible » suggère qu'il est important d'améliorer la situation des personnes en-dessous du seuil minimal tandis que la théorie dite « forte » donne une priorité absolue à ces personnes, et proportionnellement au manque de ressources (Meyer et Roser, 2009). Les personnes en-dessous du seuil minimal de ressources défini sont considérées comme étant socialement exclues (Lucas, 2012).

2.2.1.3 Utilitarisme

Le concept utilitariste est l'un des plus populaires dans la pratique puisqu'il est à la base de l' « analyse coûts bénéfices » qui est la métrique la plus utilisée pour l'évaluation de projets en transport (Di Commo et Shiftman., 2017), et présentée en partie 2.2.2.1. La théorie utilitariste part du principe que tous les individus sont égaux et qu'il faut maximiser le bien-être total de la population. Ainsi, la distribution des ressources qui est jugée la plus socialement acceptable est celle qui maximise l'utilité que la population en tire. Dans un objectif de planification, c'est l'option qui maximise cette utilité agrégée qui est jugée la meilleure (Van Wee et Geurs, 2011).

2.2.1.4 Capacitisme

Le principe capacitiste s'intéresse aux capacités des individus à traduire une ressource brute en utilité. Pereira et al. (2017) estiment que certains principes de distribution accordent trop d'importance à la ressource et pas assez à l'utilité dérivée. Contrairement à l'utilitarisme, cette approche ne considère pas tous les individus comme égaux et se concentre sur les besoins, préférences et capacités variables des individus pour traduire une ressource en utilité. Le but est que les individus aient une liberté de choix, en accord avec leurs conditions spécifiques (Pereira et al., 2017). Cette approche reste peu employée dans la pratique par sa difficulté d'opérationnalisation. Les études d'accessibilité incluant des coûts de trajet variables selon les individus s'approchent de ce concept. Cependant, l'accessibilité peut être considérée comme la ressource à distribuer, ce qui peut générer des confusions.

2.2.2 Équité et transport

Le transport est fortement lié à différentes questions sociales. En tant que facilitateur d'accès aux différentes opportunités (soins, emplois, éducation, etc.), il peut améliorer les conditions de vie des individus (notamment les plus vulnérables). Mais au contraire, un déficit de transport combiné à

des conditions socio-économiques défavorables peut entrainer l'exclusion sociale des individus : le transport est considéré comme un facteur clef de ces enjeux.

La suite de cette partie présente les liens entre l'équité et le transport. La première sous partie présente les évaluations d'équité en transport et la seconde parle d'exclusion sociale.

2.2.2.1 Évaluer l'équité

La principale difficulté pour évaluer ou diagnostiquer l'équité dans le domaine du transport est de définir les coûts et les bénéfices ainsi que le principe de distribution des ressources (Di Ciommo et Shiftman, 2017). Le principe utilitariste de justice distributive est le plus populaire mais il néglige certains groupes qui ne peuvent pas supporter les coûts ou qui ont des besoins spécifiques de mobilité. De plus, ces mesures favorisent les individus avec un meilleur revenu qui font plus de déplacements et pour qui les bénéfices ont un plus grand poids dans la mesure (Di Ciommo et Shiftman, 2017). Dans ce sens, le concept d'équité en transport a évolué pour inclure des facteurs spatiaux et sociaux aux diagnostics, en introduisant le concept d'accessibilité (Levitas et al., 2007). Bien que Rawls n'ait jamais défini l'accessibilité comme un « bien social primaire » (qui sont les biens à distribuer pour atteindre la justice sociale), Martens (2012) a montré que le transport et l'accessibilité sont des biens qui ont une signification sociale au même titre que l'éducation ou la santé (Lucas et al., 2015). Les récentes études d'équité en transport vont dans ce sens et considèrent l'accessibilité comme la ressource à distribuer sur la population. Cette distribution de ressources peut être étudiée selon deux dimensions principales de l'équité : l'équité horizontale et l'équité verticale. De plus, l'équité en transport peut être étudiée socialement (entre les individus) ou spatialement (entre les zones), mais les schémas d'analyse et les métriques employées sont analogues. Ainsi la distinction sera rarement faite par la suite.

Les prochaines parties présentent rapidement l'analyse avantages-coûts qui est la métrique la plus populaire en évaluation de projet en transport, puis l'équité horizontale et l'équité verticale, ainsi que les métriques qui leurs sont associées.

Analyse avantages-coûts

L'analyse avantages-coûts est la méthode la plus populaire pour évaluer les projets en transport (Di Ciommo et Shiftman, 2017). Cette mesure se base sur la théorie utilitariste de distribution des ressources : la meilleure répartition est celle permettant une utilité globale maximale. Le principe

de l'analyse avantages-coûts est d'évaluer tous les avantages et les coûts en valeur monétaire pour guider la prise de décision. En transport, cette analyse est conduite selon un point de vue sociétal (Di Ciommo et Shiftman, 2017), c'est-à-dire que les avantages et les coûts sociaux sont convertis en monnaie. Lucas et al. (2015) précisent que les coûts sont généralement simples à évaluer en valeur monétaire (construction, maintenance, etc.) alors que les avantages (qui sont en majorité sociaux) sont généralement mesurés par les temps de trajet gagnés, convertis en monnaie avec le principe de la « volonté de payer » (willingness to pay). L'avantage de cette méthode est qu'elle agrège tous les coûts et les avantages en une seule valeur, permettant de comparer simplement les différents projets (Di Ciommo et Shiftman, 2017). Cependant cette méthode est critiquée, notamment car il est difficile d'évaluer l'équité correctement : elle ne différencie pas les avantages, elle ne permet pas d'étudier les effets autres qu'économiques, elle ne distingue pas les individus qui paient les coûts de ceux qui reçoivent les avantages, elle favorise les personnes faisant le plus de déplacements (plus haut revenus) (Di Ciommo et al., 2017). Une autre méthode proche est l'analyse multicritère qui attribue un score à un projet selon différents critères (différents indicateurs) pondérés. Cette méthode est plus complexe et demande des professionnels qualifiés pour sa mise en place, mais permet de répondre à différents enjeux de l'analyse avantages-coûts.

Équité horizontale

L'équité horizontale part du postulat que tous les individus d'un groupe ou d'une région sont égaux et doivent donc être traités également (Ashik et al., 2024). Par exemple, en transport et en utilisant l'accessibilité comme ressource à distribuer, l'équité horizontale veut que chaque individu ait la même accessibilité aux différentes opportunités. Les métriques pour évaluer l'équité horizontale sont nombreuses et basées sur l'analyse de la distribution de l'accessibilité entre les individus, en voici une liste non exhaustive : la courbe de Lorenz et l'indice de Gini, l'indice de Theil, l'indice d'Atkinson ou encore le coefficient de variation (Yang et al., 2024 ; Ashik et al., 2024 ; Tahmasbi et al., 2019). Rahman et al. (2015) utilisent l'indice de Moran pour attribuer un score à différents services, selon s'ils sont groupés spatialement (avantageant certaines zones) ou au contraire dispersés. Parmi ces indicateurs, le plus populaire est l'indice de Gini basé sur la courbe de Lorenz. En se basant sur l'accessibilité par exemple, la courbe de Lorenz représente la part cumulée de l'accessibilité en fonction de la part cumulée de la population, comme le montre la Figure 2-1 :

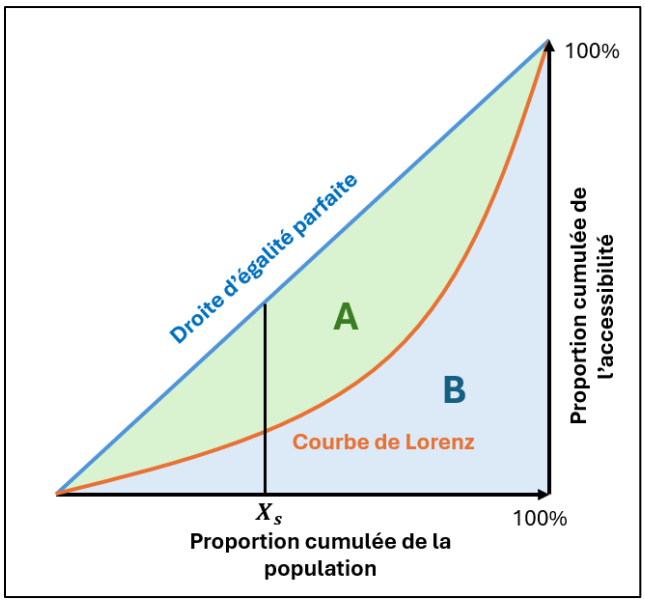


Figure 2-1 : Courbe de Lorenz et indice de Gini (inspiré de Lucas et al., 2016)

L'indice de Gini est égal au rapport de la surface au-dessus de la courbe de Lorenz sur la surface en-dessous de la ligne de distribution égale. Un coefficient de 0 indique une égalité parfaite et un coefficient de 1 indique l'inverse : toutes les ressources sont détenues par un individu. Sur ce schéma, Lucas et al. (2016) séparent les personnes socialement exclues des personnes qui ne le sont pas (seuil X_s) et intègrent ainsi le concept suffisantiste à cette évaluation d'équité, pour considérer l'exclusion sociale dans la mesure. Enfin, certaines études ont déjà implémenté le coefficient de Gini dynamique mesuré à différents instants de la journée, basé sur une mesure dynamique de l'accessibilité (Jarv et al., 2018; Li et al., 2024).

Équité verticale

L'équité verticale considère que tous les individus ne sont pas égaux en termes de besoins et que les individus les plus vulnérables doivent être priorisés pour la distribution des ressources, pour ainsi réduire les inégalités (Tahmasbi et al., 2019). Ainsi, mesurer l'équité verticale passe par la définition de groupes d'individus vulnérables à partir d'indicateurs sociaux et le choix de ces indicateurs est critique (Ashik et al., 2024). Le revenu, l'appartenance à un groupe minoritaire, le type de logement et le genre sont des variables courantes (Ashik et al., 2024). Litman (2007) soutient que la vulnérabilité est un phénomène cumulatif proportionnel au nombre de facteurs de risque. Ainsi, Michaud (2019) a développé un indice de vulnérabilité cumulatif à l'échelle

individuelle, basée sur les travaux de Foth et al. (2013), Currie (2010) et Fransen et al. (2015), à l'échelle zonale.

Les métriques pour évaluer l'équité verticale sont moins nombreuses que pour l'équité horizontale qui a plus été étudiée, mais différentes méthodes ont été développées dans les dernières années. Une méthode populaire est l'utilisation du coefficient de corrélation de Spearman (Yang et al., 2024) qui calcule la corrélation entre les rangs de vulnérabilité (selon l'indice de vulnérabilité choisi) et les rangs d'accessibilité. Zhang et al. (2022) étudient le coefficient de corrélation de Spearman toutes les quatre heures entre 8 :00 et 20 :00 en se basant sur l'accessibilité dynamique. Une autre méthode d'évaluation d'équité verticale se base sur l'indice de Gini, pondéré selon le niveau de vulnérabilité des individus (Tahmasbi et al., 2019). Cependant, il faut faire attention, mesurer l'indice de Gini sur différents groupes de vulnérabilité ne relève pas de l'équité verticale car cela n'indique pas si les personnes les plus vulnérables sont avantagées ou non par la distribution des ressources (Ashik et al., 2024). Une analyse de la structure spatiale est proposée par Ashik et al. (2020) pour évaluer l'équité verticale. Pour cela, ils examinent la correspondance entre les modèles statistiques locaux significatifs d'accessibilité spatiale et d'accessibilité aspatiale.

2.2.2.2 Exclusion sociale par le transport

Le principe d'exclusion sociale est apparu pour les premières fois en 1965 dans le livre de Jean Klanfer intitulé « L'Exclusion sociale : Étude de la marginalité dans les sociétés occidentales » (Paez et al., 2009) comme étant « les individus qui ne peuvent pas profiter des conséquences positives du progrès économique en raison d'un comportement irresponsable » et à travers les termes de Weber de « clôture sociale » (« social closure ») qui renvoie à la « tentative d'un groupe de s'assurer une position privilégiée [dans la société] aux dépens d'un autre groupe par le biais d'un processus de subordination » (Paez et al., 2009). Le concept a depuis évolué et renvoie à la condition sociale liée à l'accès limité aux opportunités du marché (Béland, 2007). Il n'y a cependant pas de consensus sur ce qui constitue précisément l'exclusion sociale et Lucas (2012), dans sa revue « Transport and social exclusion: Where are we now? », cite Levitas et al. (2007) pour définir l'exclusion sociale comme « l'absence de ressources, de droits, de biens et de services, et l'incapacité de participer aux relations et aux activités normales dont dispose la majorité des personnes dans la société ». L'exclusion sociale et la pauvreté sont proches il existe une distinction : la pauvreté est caractérisée par un manque de ressources alors que l'exclusion sociale

est l'incapacité d'exercer ses droits. Le premier est un état statique et le second est un processus dynamique (Paez et al., 2009).

Le transport joue un rôle clef dans presque toutes les dimensions de l'exclusion sociale (Paez et al., 2009), comme le montre la Figure 2-2 traduite de Lucas (2012) :

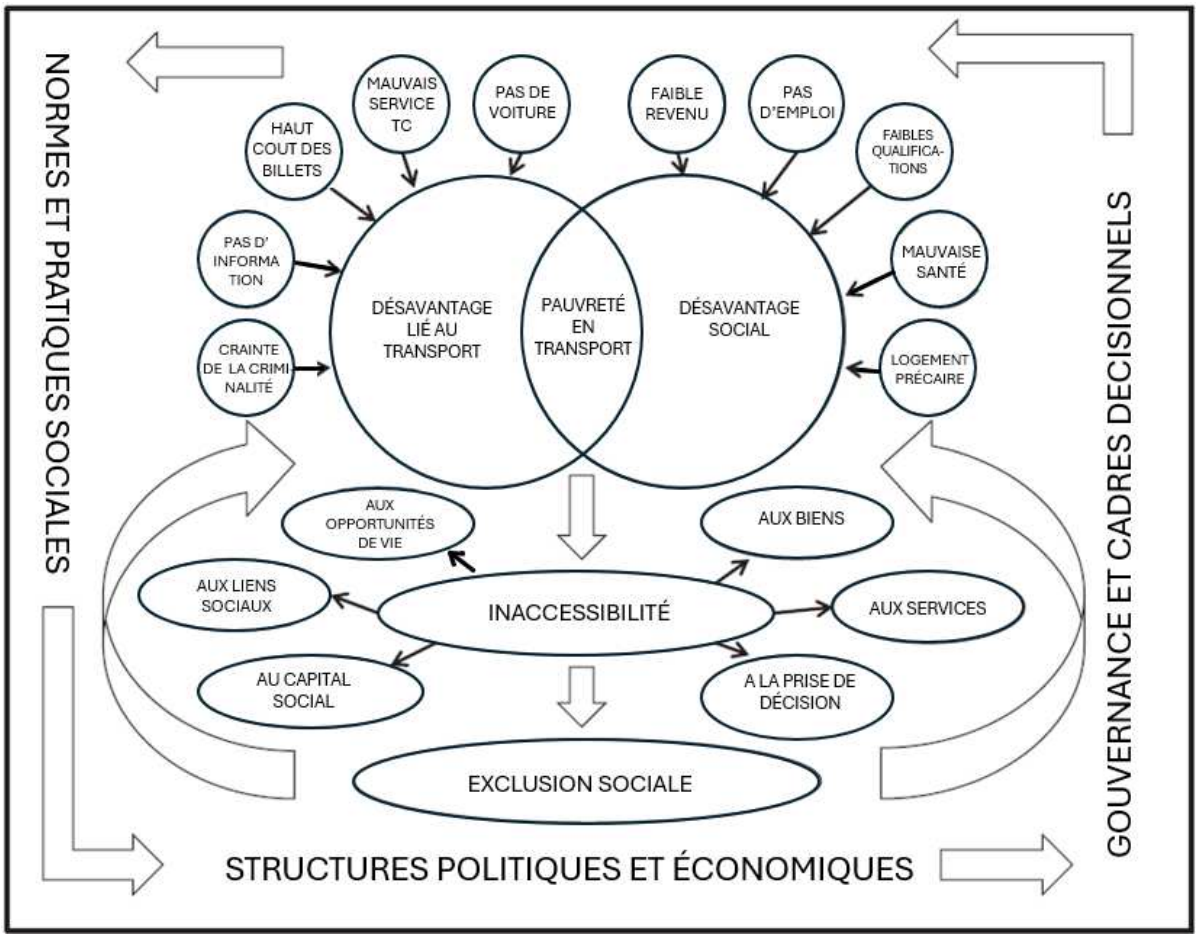


Figure 2-2 : Relation entre le transport et l'exclusion sociale (traduit de Lucas, 2012)

Ainsi, ils estiment que la combinaison de désavantages sociaux et de désavantages en transport mène à la pauvreté de transport qui cause le manque d'accès aux activités et ainsi l'exclusion sociale. Church et al. (2000) identifient sept caractéristiques du système de transport qui contribuent à l'exclusion sociale : l'exclusion physique (pour les personnes en situation de handicap par exemple), l'exclusion géographique (distance au système de transport), l'exclusion aux activités (distance à l'école, aux hôpitaux, etc.), l'exclusion économique (prix des transports), l'exclusion temporelle (contraintes temporelles liées à des obligations et restreignant les possibilités de déplacement), l'exclusion basée sur la peur (sentiment d'insécurité lié à certains

transports) et l'exclusion de l'espace (par l'aménagement d'espaces publics contraignant certains groupes sociaux). Finalement, le lien entre exclusion sociale et transport est couramment nommé « exclusion sociale liée au transport » (transport-related social exclusion) et différentes études proposent des indicateurs pour quantifier cette notion. Preston et Raje (2007) proposent trois critères pour mesurer l'exclusion sociale liée au transport : la mesure doit inclure le niveau de déplacement global de la zone étudiée, le niveau de déplacement des individus ou des groupes et l'accessibilité globale de la zone. Cela permettrait de ne pas isoler les personnes socialement exclues lors de l'analyse et de mieux comprendre la situation pour proposer des mesures adaptées (Paez et al., 2012).

2.3 Synthèse

L'accessibilité est une notion multidimensionnelle qui fait intervenir quatre composantes majeures : le système de transport, l'utilisation du sol, les individus et le temps. Les mesures d'accessibilité les plus populaires sont les mesures basées sur la localisation, qui évoluent ces dernières années vers des mesures plus dynamiques. Cependant, cela se limite généralement au transport et les deux autres composantes sont considérées statiques. Des études ont relevé ces limites et proposé des méthodes d'intégration dynamique de la population mais elles se limitent à l'étude d'une seule mesure d'accessibilité et n'approfondissent pas le volet de l'équité. En effet, l'accessibilité est un concept clef dans les études d'équité en transport et les méthodes d'évaluation s'intéressent de plus en plus à l'équité verticale. Enfin l'accessibilité (ou la non-accessibilité) est centrale à l'exclusion sociale et ce sujet peut être intégré aux études d'équité avec le concept suffisantiste, mais cela s'est limité à l'équité horizontale.

La présente recherche propose des éléments de réponses aux différentes limites identifiées. Quatre mesures d'accessibilité basées sur la localisation sont étudiées : l'accessibilité est mesurée de façon statique, puis intégrant étape par étape les dynamiques du transport, des opportunités et des individus. Deux angles d'analyses sont proposés, le premier est l'étude de l'intégration des dynamiques urbaines sur chaque mesure d'accessibilité. Le second est la comparaison des différentes mesures d'accessibilité selon les dynamiques considérées. Les analyses sont menées à partir de la distribution de l'accessibilité sur les individus et dans le temps, ainsi qu'à partir de diagnostics d'équité basés sur l'accessibilité. En effet, des évaluations d'équité horizontale et

d’équité verticale sont menées. Pour la dernière, cette étude propose une méthode d’intégration du principe suffisantiste de justice distributive.

CHAPITRE 3 METHODOLOGIE

Cette partie présente la méthodologie développée pour répondre aux différents objectifs de cette recherche. La méthodologie générale en est un résumé, tous les détails sont donnés ensuite.

3.1 Méthodologie générale

La méthodologie générale consiste à mesurer l'accessibilité aux commerces alimentaires en transport collectif sur l'île de Montréal toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00, avec quatre mesures d'accessibilité basées sur la localisation et dans quatre contextes statiques-dynamiques (qui correspondent à l'intégration au fur et à mesure des dynamiques du transport, des opportunités et des individus). Les commerces alimentaires ont été sélectionnés comme type d'opportunités pour différentes raisons : pour l'intérêt qui leur est porté dans la littérature, pour les variations temporelles de leur disponibilité et pour l'existence de diverses bases de données les décrivant sur l'île de Montréal.

Les quatre cadres d'étude statiques-dynamiques sont donnés dans le Tableau 3-1 :

Tableau 3-1 : Cadres d'études statiques-dynamiques

Cadre d'étude	**Population**	**Opportunités**	**Transport**
Statique	Statique	Statique	Statique
Statique-Dynamique 1	Statique	Statique	Dynamique
Statique-Dynamique 2	Statique	Dynamique	Dynamique
Dynamique	Dynamique	Dynamique	Dynamique

Les quatre mesures d'accessibilité utilisées sont données et définies à la suite du Tableau 3-2 qui donne la signification des différentes variables utilisées dans les mesures.

Tableau 3-2 : Variables des mesures d'accessibilité

Variable	Signification
i	Point origine de la mesure
j	Point commerce
S_j	Superficie du commerce
t_{ij}	Temps de trajet entre i et j
δ	Temps maximal d'accès
f	Fonction de friction
P_k	Population au point k

La première mesure étudiée est la mesure d'opportunités cumulées :

$$A_{OC}(i) = \sum_j (S_j)_{t_{ij}<\delta} \qquad (16)$$

La deuxième est la mesure gravitaire :

$$A_G(i) = \sum_j \left(\frac{S_j}{f(t_{ij})}\right)_{t_{ij}<\delta} \qquad (17)$$

La troisième est la mesure par zone de captage flottante en deux étapes (2SFCA) :

$$A_{2SFCA}(i) = \sum_j \left(\frac{S_j}{f(t_{ij})V_j}\right)_{t_{ij}<\delta} \qquad (18)$$

La dernière est la mesure par zone de captage flottante en deux étapes modifiée (M2SFCA) :

$$A_{M2SFCA}(i) = \sum_j \left(\frac{S_j}{f(t_{ij})f(t_{ij})V_j}\right)_{t_{ij}<\delta} \qquad (19)$$

Avec le terme représentant la concurrence aux commerces :

$$V_j = \sum_k \left(\frac{P_k}{f(t_{kj})}\right)_{t_{kj}<\delta} \qquad (20)$$

Les mesures basées sur la localisation sont calculées depuis des points d'origine définis. Ici, les mesures d'accessibilité sont effectuées depuis 961 points de l'île de Montréal qui sont 961 logements sélectionnés aléatoirement parmi la liste des unités d'évaluation foncière.

Le Tableau 3-3 présente un résumé des autres données utilisées :

Tableau 3-3 : Résumé des données

	Sous-composantes	**Données**	
		Statique	**Dynamique**
Population	Coordonnées	Enquête OD (domicile)	Enquête OD
Opportunités	Coordonnées	354 « shop » OSM de type alimentaire	
	Superficie	Données OSM	
	Horaires d'ouvertures	Toujours ouvert	Données OSM et consolidation manuelle
Transport	Horaires	Données GTFS: STM, STL, RTL	
	Temps de trajet	Interface Transition Heure de pointe	Interface Transition Toutes les 15 minutes

Avec ces mesures d'accessibilité, deux analyses d'équité sont menées : une analyse d'équité horizontale et une analyse d'équité verticale. L'analyse horizontale considère tous les individus comme égaux et est menée avec l'indice de Gini. L'équité verticale suggère que les individus les plus vulnérables doivent disposer de plus de ressources; elle est menée avec le coefficient de corrélation de Spearman qui met en relation la vulnérabilité des individus et leur niveau d'accès aux ressources :

$$r_s = \frac{Cov(R_{Acc}, R_{Vuln})}{\sigma R_{Acc} \sigma R_{Vuln}} \quad (21)$$

$R_{Acc}\ et\ R_{Vuln}$ sont respectivement le rang d'accessibilité et le rang de vulnérabilité. Les individus sont classés en six groupes de vulnérabilité (le groupe de rang 1 est le moins vulnérable tandis que le groupe de rang 6 est le plus vulnérable), pour lesquels l'accessibilité est étudiée puis classée de 1 à 6 (l'accessibilité de rang 1 est la moins bonne accessibilité).

Les rangs de vulnérabilité sont définis une fois tandis que les niveaux d'accessibilité sont donnés selon différentes méthodes. La première classe l'accessibilité brute en comparant les médianes d'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité, à chaque instant.

La seconde méthode inclut le concept suffisantiste dans l'évaluation des niveaux d'accessibilité. Ce concept suggère que toute personne doit avoir accès à une quantité minimale de ressources. Le groupe de vulnérabilité ayant le meilleur niveau d'accessibilité est le groupe dont la part de population ayant accès à ce seuil minimal est la plus grande.

Dans un contexte dynamique, différentes approches suffisantistes sont considérées.

Première approche : Chaque personne doit avoir accès à un minimum de ressources à chaque instant de la journée. Les parts de personnes de chaque groupe ayant accès à ce minimum sont calculées à chaque instant de la journée, ainsi l'est le coefficient de Spearman. Le seuil minimal est défini comme étant la moitié de la médiane, mesurée dans le cadre d'étude statique.

Deuxième approche : Chaque personne doit avoir accès à un minimum de ressources sur une période de la journée. Pour cette analyse, les parts de chaque groupe ayant accès à ce minimum à chaque instant entre 16 :00 et 20 :00 sont calculées. Le coefficient de Spearman est basé sur ces scores.

Troisième approche : La dernière approche suggère que l'accessibilité est une ressource qui se cumule et que chaque personne doit avoir accès à un minimum d'accessibilité totale sur la journée. Les parts de personnes de chaque groupe ayant accès, au total, à ce minimum sont comparées.

Pour conclure cette partie, le Tableau 3-4 récapitule les 16 études d'accessibilité menées :

Tableau 3-4 : Récapitulatif des études d'accessibilité

		Cadres d'étude statiques-dynamiques			
		Statique	SD1	SD2	Dynamique
Mesures	*Opportunités cumulées*	*OC-S*	OC-SD1	OC-SD2	OC-D
	Gravitaire	*Grav-S*	*Grav*-SD1	*Grav*-SD2	*Grav*-D
	2SFCA	*2SFCA-S*	*2SFCA*-SD1	*2SFCA*-SD2	*2SFCA*-D
	M2SFCA	*M2SFCA-S*	*M2SFCA*-SD1	*M2SFCA*-SD2	*M2SFCA*-D

Que ce soit en termes d'accessibilité mesurée ou en termes d'équité diagnostiquée, les analyses menées suivent deux angles d'études : par ligne (*Comment se comporte une mesure d'accessibilité en dynamisant ses paramètres ?)* et par colonne (*Comment évoluent les différences entre mesures dans les différents contextes statiques-dynamiques ?).*

3.2 Contexte d'étude

L'objectif général de cette recherche est de comparer différentes mesures d'accessibilité dans différents contextes dynamiques. Pour que les comparaisons soient valables, un contexte d'étude d'accessibilité commun doit être défini. De plus, la définition d'un cadre d'étude est la base de toute mesure d'accessibilité. Le cadre des mesures opérées dans cette recherche est l'étude de

l'accessibilité aux commerces alimentaires sur l'île de Montréal en transport collectif, au cours d'une journée de semaine. Ainsi, les résultats présentés dans ce mémoire ne sont pas généralisables à d'autres contextes d'étude, mais la méthode peut être reproduite.

Le territoire d'étude est l'Agglomération de Montréal et est présenté ci-dessous. Les autres éléments sont définis dans la suite du mémoire. L'agglomération de Montréal est représentée sur la Figure 3-1: les polygones rose clair délimitent l'Agglomération de Montréal et les rose foncé représentent les limites terrestres. Cette agglomération s'inscrit dans un ensemble de cinq régions formant la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). L'agglomération de Montréal regroupe les 19 arrondissements de la Ville de Montréal ainsi que 15 villes liées (ensemble de 34 zones visibles sur la Figure 3-1) pour une superficie de presque 500 km². Le recensement de 2021 comptait 2 004 265 personnes vivant dans l'agglomération de Montréal.

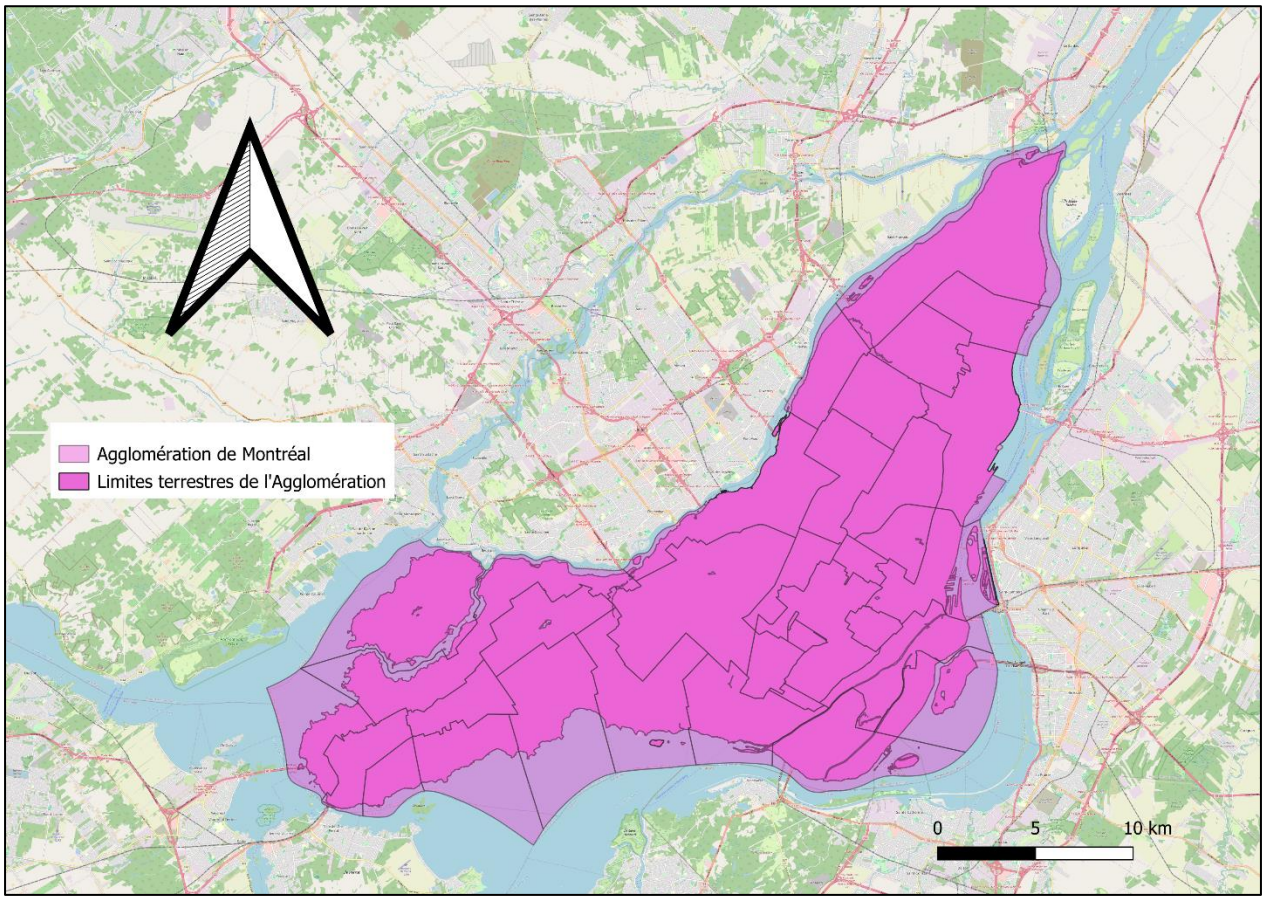


Figure 3-1 : Territoire d'étude

L'Agglomération de Montréal est parcourue par un réseau de transport collectif constitué essentiellement de bus et de quelques lignes de transport collectif à haute fréquence : quatre lignes de métro (71 km), le Réseau express métropolitain (REM) et le Système rapide par bus Pie-IX.

Enfin, les limites du territoire d'étude définies ici concernent uniquement les origines des mesures d'accessibilité et la population considérée. Le réseau de transport collectif et les opportunités considérées s'étendent au-delà de ces frontières, pour permettre de mesurer correctement l'accessibilité des personnes aux frontières de l'Agglomération. Toutes ces données sont présentées dans les parties suivantes.

3.3 Description des données

La suite de cette partie présente les différentes données utilisées et leur traitement dans le cadre de cette recherche.

3.3.1 Rôle d'évaluation foncière

L'évaluation foncière municipale qui est plus connue sous le nom d'impôt foncier, sert principalement au financement de prestations de services municipaux ou scolaires. Cette taxation est basée sur la valeur réelle d'une unité d'évaluation où la valeur réelle est la valeur d'échange du bien sur le marché, et où l'unité d'évaluation est un bâtiment ou regroupement de bâtiments détenus par un même propriétaire (https://www.mamh.gouv.qc.ca/evaluation-fonciere/).

Le rôle d'évaluation foncière est une base de données regroupant toutes les informations nécessaires à cette taxe et assurant la transparence de cette fiscalité. La loi exige que le rôle d'évaluation foncière soit renouvelé et équilibré tous les trois ans. En dehors de ces périodes d'évaluation, le rôle doit être mis à jour obligatoirement à la suite de certains évènements prévus dans la loi.

Le rôle résume l'inventaire des bâtiments présents sur le territoire d'une municipalité et a l'obligation d'être rendu public pour toute personne souhaitant le consulter (https://www.mamh.gouv.qc.ca/evaluation-fonciere/evaluation-fonciere-municipale-au-quebec/role-devaluation-fonciere/).

Dans le cadre de cette recherche, la liste des unités d'évaluation foncière a été récupérée pour l'agglomération de Montréal. Cette liste a l'avantage d'être disponible au format texte, GeoJSON

et Shapefile. Elle présente directement les informations sur les bâtiments de l'évaluation foncière, telles que l'adresse, le nombre d'étages, la superficie ou le type d'utilisation.

La première volonté était de mesurer l'accessibilité à l'échelle du bâtiment sur l'île de Montréal. Ainsi la liste des unités d'évaluation foncière a été choisie comme base de données des logements sur l'île de Montréal pour définir les origines des mesures d'accessibilité (voir 3.5.5) : seuls les bâtiments de type « Logement » ou « Logement vacant dans un bâtiment comportant plusieurs logements ou autres locaux » ont été identifiés grâce à l'attribut « LIBELLE_UT », en tant qu'origine des calculs. Cette sélection retourne 457 539 éléments sur l'île de Montréal. Pour limiter les temps de calcul, un échantillon aléatoire de 1000 logements est utilisé pour mesurer l'accessibilité sur l'île de Montréal. Après retraitement des données, 961 logements sont étudiés et un diagramme de Voronoï est tracé pour représenter tout le territoire d'étude. Cette étape est présentée en partie 3.8 lorsque l'accessibilité est distribuée sur la population.

Le fichier Shapefile présente les bâtiments comme une couche de polygones. Ils sont agrégés à leur centroïde pour récupérer une couche de points, utilisables comme origines de calculs d'accessibilité. Ces manipulations sont effectuées dans QGIS.

L'attribut « LIBELLE_UT » utilisé pour sélectionner les logements présente d'autres types d'utilisation des bâtiments. Comme « Vente au détail de marchandises en général » ou encore « Vente au détail de fruits et de légumes » par exemple, qui pourrait retourner la liste exhaustive des commerces alimentaires vers lesquels l'accessibilité est calculée. Cependant ce n'est pas le cas pour les bâtiments partageant diverses activités, pour lesquels l'attribut « LIBELLE_UT » reste unique; ce genre de bâtiments n'est donc pas séparé en différents éléments dans la liste. Cela a été vérifié dans un environnement quelconque : la plupart des commerces connus n'apparaissent pas en tant que tels dans la liste. Ainsi, les services alimentaires ont été identifiés à partir d'une autre source de données.

3.3.2 OpenStreetMap

OpenStreetMap est un service collaboratif de cartographie en ligne (que l'on peut retrouver sous l'acronyme IGB pour « Information géographique volontaire » ou VGI en anglais pour « Volunteered Geographic Information »). C'est un projet open source lancé en 2004 à l'University College de Londres, qui est toujours responsable de l'hébergement. Cette base de données en ligne répertorie une importante quantité d'information concernant l'utilisation du sol (routes, bâtiments,

géologie, etc.). Le site tire ses forces et ses faiblesses de son fonctionnement collaboratif : les données sont gérées par la communauté et libres d'utilisation dans n'importe quel but tant qu'OpenStreetMap et ses contributeurs sont crédités [https://www.openstreetmap.org/about]. Cela permet une gestion des données en temps réel par l'ensemble de la communauté (n'importe quelle personne disposant d'un réseau internet) mais par conséquent, le serveur est dépendant du caractère volontaire de ses utilisateurs. Différents critères permettent d'évaluer la qualité des données et de classer le type d'erreur que l'on peut rencontrer (ISO 19157:2013) (Yamashita et al., 2023) : exhaustivité, cohérence logique, précision de positionnement, précision temporelle et précision thématique. Les données OpenStreetMap sont sujettes à ce genre d'erreurs, donc à un certain décalage avec la réalité. Les résultats de calculs se basant sur celles-ci sont à manipuler avec précaution.

Finalement, ce sont les données OpenStreetMap qui ont été utilisées dans le cadre de ce mémoire pour définir l'ensemble des points « commerces » qui sont les points de destination du calcul d'accessibilité. La récupération de ces données s'est faite grâce à Overpas Turbo qui est « un outil web de filtrage de données pour OpenStreetMap » (https://overpass-turbo.eu/index.html) en permettant l'extraction. La base de données des commerces a été construite à partir des données OpenStreetMap présentant les attributs suivants : "shop"="supermarket"; "shop"="greengrocer"; "shop"="farm"; "shop"="deli". Ils ont été choisis parmi la liste exhaustive d'attributs OpenStreetMap que l'on retrouve sur le wiki (https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features). La sélection a été faite en considérant les commerces proposant une gamme de produits saine nécessaire à l'alimentation, comme les fruits et les légumes. Ainsi les boucheries, poissonneries, boulangeries, dépanneurs et autres commerces ne répondant pas (selon une considération personnelle) à ces critères ont été exclus. Ce filtrage des commerces est aussi justifié par le fait qu'un calcul d'accessibilité doit être effectué vers des points d'intérêt similaires.

A cette étape, 753 entités sont récupérées : 378 sur l'île de Montréal et 375 à l'extérieur (Figure 3-2). Les commerces hors de l'île ont été sélectionnés puisqu'ils constituent également une destination pour les logements proches des frontières de l'île.

Ces 753 entités extraites au format geojson sont aussi bien des couches de points que de polygones. Les polygones ont été transformés en leur centroïde et finalement toutes les données ont été regroupées pour ne former qu'une couche de points.

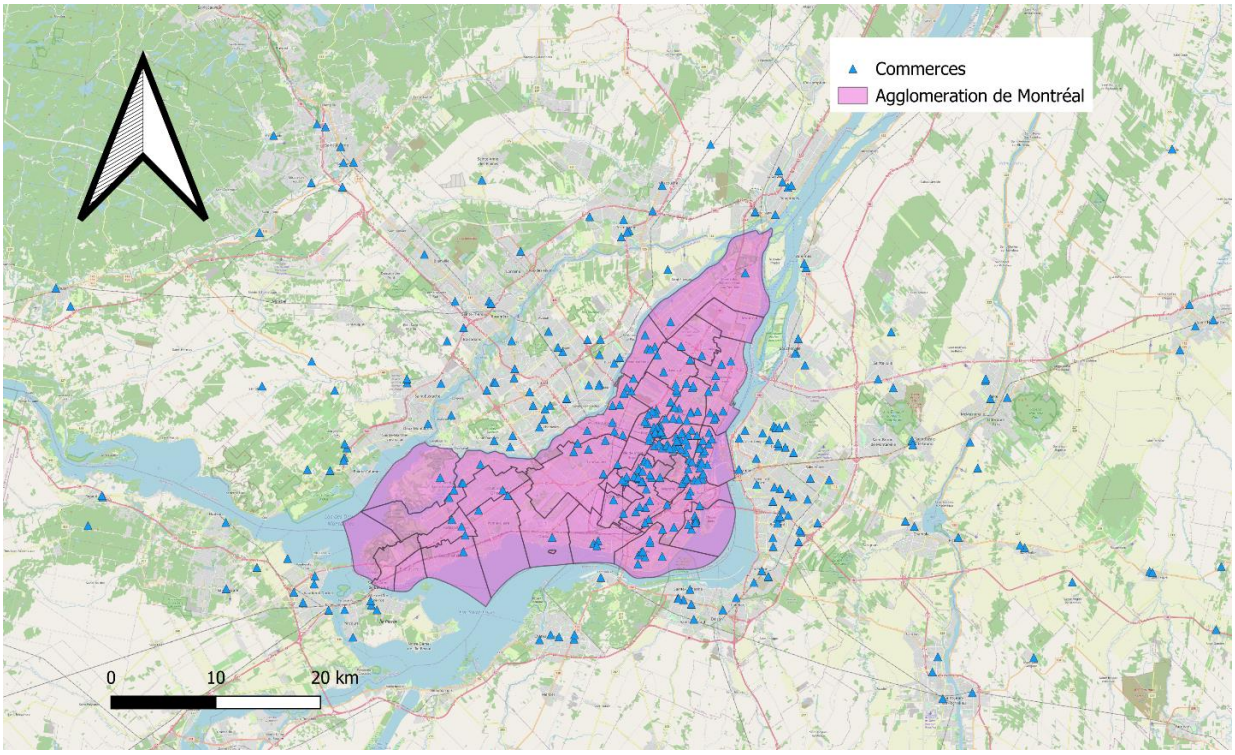


Figure 3-2: Commerces extraits d'OpenStreetMap

Enfin OpenStreetMap permet aux utilisateurs de spécifier la plage horaire d'ouverture des commerces, qui est une donnée centrale au calcul d'accessibilité décrit dans ce mémoire. C'est la première raison du choix d'OpenStreetMap comme source des données « commerces ». Cependant ces données sont peu mises à jour et incomplètes (182/753 commerces offrent cette donnée, soit 24%). Pour cette raison, les données horaires ont été récupérées avec Google Maps, ce qui constitue la partie suivante.

3.3.3 Google Maps

Google Maps est un service de cartographie en ligne lancé par l'entreprise éponyme Google. Ses sources de données sont publiques, privées, satellites et de contribution volontaire. Parmi ses nombreux services, Maps permet une visualisation rapide des horaires d'ouverture de la majorité des points d'intérêts. Ces informations sont utilisées comme référence par une partie de la population et sont les données les plus à jour disponibles à ce sujet. Ainsi, ce sont ces données qui sont utilisées dans le présent mémoire pour représenter la variabilité temporelle de la disponibilité des services alimentaires sur l'Île de Montréal.

3.3.4 Données GTFS

Les General Transit Feed Specification, plus connus sous le nom de données GTFS, sont des données regroupées en base de données relationnelle pour représenter l'offre d'un service de transport collectif. Ce format de données est apparu en 2005 à l'issu d'une collaboration entre TriMet (agence de transport en commun pour la région de Portland) et Google (Fortin et al., 2016). Au cours de la dernière décennie, ce format s'est établi comme le standard d'encodage des données relatives aux horaires des transports collectifs (Wessel et Farber, 2019) : environ un millier d'agences dans le monde génèrent et tiennent à jour une base de données GTFS pour stocker les informations relatives à leur service. La spécification définit six fichiers CSV obligatoires et sept fichiers additionnels (optionnels) pour former une base de données de GTFS valable. L'ensemble de ces fichiers et leur organisation relationnelle sont donnés sur la Figure 3-3 (traduite de Fortin et al., 2016) :

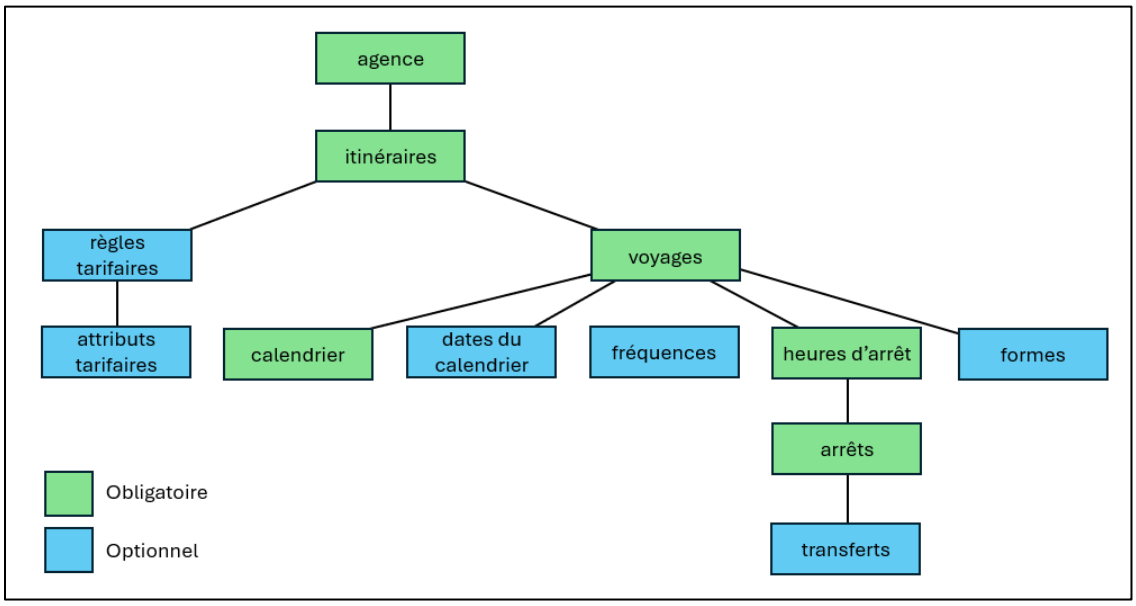


Figure 3-3 : Organisation relationnelle des données GTFS (traduit de Fortin et al., 2016)

Les usages de ces données sont multiples et le plus répandu est l'intégration à des applications pour fournir de l'information aux usagers (Fortin et al., 2016; Wessel et Farber, 2019). Un autre usage, qui est celui du présent mémoire, est le calcul de temps de trajet pour des études d'accessibilité et notamment d'études d'accessibilité dynamiques. En effet, un nombre croissant d'études incorpore

les variations temporelles aux mesures d'accessibilité en transport collectif (Guo and Brakewood, 2024) grâce à la disponibilité croissante de ces données GTFS (Stępniak et al., 2019).

Pour ce mémoire, les données GTFS utilisées sont celles des trois agences présentent sur et aux alentours du territoire d'étude : la STM (Société de Transport de Montréal), la STL (Société de Transport de Laval) et la RTL (Réseau de Transport de Longueuil). En effet, le territoire d'étude n'inclut pas Laval et Longueuil mais certaines personnes peuvent bénéficier des opportunités présentes sur ces territoires via les réseaux de transport associés. Ainsi, les données GTFS de la STL et du RTL sont considérées. Finalement, les données GTFS utilisées représentent la période qui était en cours, lors de leur téléchargement en novembre 2023 : soit les données de la période du 28/08/2023 au 07/01/2024 pour la STM, du 28/10/2023 au 05/01/2024 pour la STL et du 21/08/2023 au 05/11/2023 pour le RTL. La partie 3.6.1 détaille leur utilisation.

La Figure 3-4 montre les trois réseaux présentés précédemment, sur et autour du territoire d'étude, tracés à partir du fichier shapes (optionnel) des données GTFS, relatif à la géométrie des tracés.

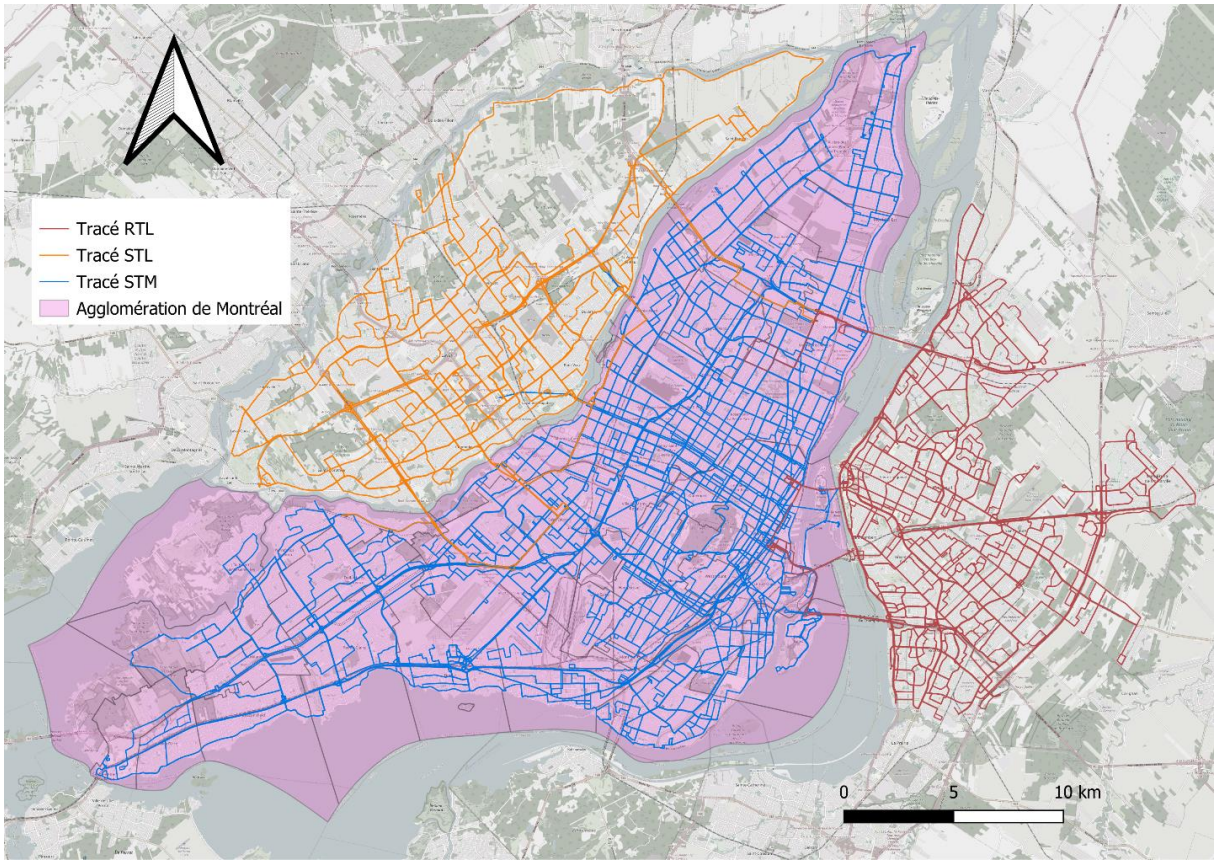


Figure 3-4 : Réseaux de transport collectif de la STM, de la STL et du RTL

3.3.5 Enquête Origine Destination 2018

L'enquête Origine-Destination est une enquête de mobilité qui est menée tous les cinq ou dix ans dans les principaux centre urbains Québécois : Montréal, Québec, Outaouais, Sherbrooke, Saguenay et Trois-Rivières. Le territoire des enquêtes regroupe 75% de la population québécoise; celles-ci sont menées sur un échantillon de ménages variant de 5% à 15%. Pour la région de Montréal en 2018, la onzième enquête Origine-Destination a été réalisée par l'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM) avec la collaboration d'exo, de la Société de Transport de Montréal (STM), de la Société de Transport de Laval (STL), du Réseau de Transport de Longueuil (RTL), du ministère des transports du Québec (MTQ), du Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitation (MAMH) et de la Communauté Métropolitaine de Montréal (CMM). L'enquête a été réalisée auprès de 74 000 ménages du 5 septembre 2018 au 22 décembre 2018 en journée de semaine et regroupe finalement presque 360 000 déplacements. L'enquête regroupe diverses informations sur le déplacement, le ménage et sur l'individu comme : les coordonnées du déplacement, le motif du déplacement, l'adresse du ménage, la motorisation du ménage, l'âge ou le sexe de la personne et bien d'autres attributs. Ces attributs permettent de nombreuses analyses des déplacements et soutiennent les exercices de planification.

Pour le présent mémoire, l'enquête Origine-Destination 2018 a été utilisée pour représenter la localisation de la population de nuit (statique) et de la population de jour (dynamique). La méthode utilisée pour passer des déplacements aux positions des individus est décrite dans la partie 3.8. Finalement, 548 806 positions sont créées à partir de cette enquête et 241 939 positions sont intégrées à l'étude (présentes sur le territoire d'étude). Les positions des individus sont nécessaires dans ce mémoire pour attribuer à chaque personne une valeur d'accessibilité (les mesures sont basées sur la localisation) de manière désagrégée et représenter la concurrence dans les mesures 2SFCA et M2SFCA. Enfin, les attributs des ménages et des individus recensés dans cette enquête sont utilisés pour former des groupes de vulnérabilité lors de l'analyse d'équité. La méthode est décrite dans la partie 3.9.2.1.

3.3.6 Recensement canadien 2016

Le recensement de la population canadienne correspond au dénombrement de la population canadienne et de ses caractéristiques. Il a lieu tous les 5 ans et est mené par Statistique Canada sur l'ensemble du pays. Il recueille différentes informations sur la population pour différents

découpages du territoire dont le plus petit découpage possible est l'aire de diffusion (AD). Le dernier recensement canadien date de l'année 2021.

Le recensement canadien n'est pas directement utilisé pour cette étude mais apparaît indirectement via le facteur d'expansion de l'enquête Origine-Destination. Le facteur d'expansion permet de passer de la population échantillonnée à la population totale : il correspond au nombre d'unités que représente une observation de l'enquête. Il existe un facteur d'expansion pour les ménages et un facteur d'expansion pour la population. Ces facteurs d'expansion sont calculés à partir des données du recensement et des attributs des répondants de l'enquête Origine-Destination. Ainsi, pour l'enquête Origine-Destination 2018, les facteurs d'expansion sont obtenus à partir du recensement canadien de 2016. Le facteur d'expansion « personne » est important pour cette étude car il permet d'estimer l'accessibilité de l'ensemble de la population du territoire d'étude et également de mener une analyse d'équité sur cette dernière.

3.4 Cadres d'étude statiques-dynamiques

Le principal objectif de cette recherche est d'étudier l'impact de l'intégration des dynamiques des trois composantes urbaines de l'accessibilité (transport, opportunités, population) sur différentes mesures. Ainsi, quatre contextes statiques-dynamiques sont définis et répertoriés dans le Tableau 3-5 :

Tableau 3-5 : Cadres d'étude statiques-dynamiques

Cadre d'étude	**Population**	**Opportunités**	**Transport**
Statique	Statique	Statique	Statique
Statique-Dynamique 1	Statique	Statique	Dynamique
Statique-Dynamique 2	Statique	Dynamique	Dynamique
Dynamique	Dynamique	Dynamique	Dynamique

L'intégration des dynamiques des différentes composantes urbaines est faite une à une et permet de passer d'une mesure complètement statique de l'accessibilité à une mesure complètement dynamique. Le choix de l'ordre d'intégration de ces dynamiques est personnel et reflète la popularité de ces considérations dans la littérature : le transport dynamique est le plus souvent intégré aux mesures, les opportunités sont parfois considérées comme temporelles et les mouvements de population sont rarement intégrés aux mesures d'accessibilité basées sur la localisation.

Pour considérer les variations temporelles des différentes composantes, il faut définir une échelle temporelle. La temporalité choisie pour cette étude est la journée de semaine. Ce choix découle de la variabilité temporelle des trois composantes présentées en introduction. Les mesures sont effectuées toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00. Cette résolution et cette fenêtre temporelle permettent de réduire le nombre de calculs de temps de trajet tout en saisissant les variations temporelles des différentes composantes. La partie 3.6 aborde plus précisément le sujet des temps de calcul de temps de trajet.

Lorsqu'une composante de l'accessibilité est considérée statique, elle est mesurée une seule fois au cours de la journée, et considérée constante sur toute cette période. Lorsqu'une composante de l'accessibilité est considérée dynamique, elle est mesurée toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00. Les détails sur les définitions statiques et dynamiques des composantes sont donnés dans la suite de la méthodologie.

3.5 Mesures d'accessibilité

L'impact de l'intégration des dynamiques urbaines sur l'accessibilité mesurée est étudié sur quatre mesures d'accessibilité qui sont présentées dans les sous-chapitres suivants. Ces quatre mesures sont choisies pour leur popularité dans la littérature et pour leur définition : chaque mesure est une évolution de la précédente par l'ajout d'un paramètre. La version modifiée de la mesure 2SFCA permet notamment de corriger un biais de distance relative, présenté par la suite. De plus, ces quatre mesures sont des mesures d'accessibilité basées sur la localisation et permettent d'évoluer la méthode de Jarv et al. (2018) d'intégration de la population dynamique sur ce type de mesure sur quatre nouvelles mesures.

Les mesures d'accessibilité dans les différents contextes statiques-dynamiques sont calculés toutes les 15 minutes (entre 7 :00 et 22 :00) à partir des valeurs statiques (constantes) et des valeurs

dynamiques (variables aux 15 minutes) des trois composantes. Finalement, les mesures d'accessibilité dynamique obtenues se classent parmi les mesures par variabilité temporelle (versus mesures par résolution temporelle qui agrègent les résultats sur des périodes définies).

Le Tableau 3-6 récapitule et définit l'ensemble des variables utilisées dans les différentes mesures d'accessibilité. Les données utilisées pour l'ensemble des calculs sont définies par la suite (le Tableau 3-6 présente où trouver les informations voulues). Pour chaque mesure, l'accessibilité est supposée proportionnelle à la superficie du commerce accessible. La superficie renvoie à la capacité d'une opportunité selon les termes employés dans la littérature 2SFCA ou renvoie au terme $g(W_j)$ de la définition de Paez et al. (2012) des mesures d'accessibilité primaires (terme de Cui et Levinson (2020)), donnée en partie 2.1.4.4.

Tableau 3-6 : Variables des mesures d'accessibilité

Variable	**Signification**
i	Point origine de la mesure (voir 3.5.5)
j	Point commerce (voir 3.7)
S_j	Superficie du commerce (voir 3.7.1)
t_{ij}	Temps de trajet entre i et j (voir 3.6)
δ	Temps maximal d'accès (voir 3.5.6)
f	Fonction de friction (voir 3.5.6)
P_k	Population au point k (voir 3.8)

Toutes les formules présentées par la suite sont des fonctions du temps. Le paramètre temporel « t » n'apparaît pas pour ne pas alourdir les formules.

3.5.1 Opportunités cumulées

La première mesure étudiée est la mesure d'opportunités cumulées (rectangulaire), qui définit l'accessibilité depuis une origine i comme étant la somme des superficies accessibles sous le seuil temporel de 25 minutes. Sa formulation mathématique est la suivante :

$$A_{OC}(i) = \sum_j (S_j)_{t_{ij}<\delta} \qquad (22)$$

Les variables sont données dans le Tableau 3-6 de la partie précédente. La définition du seuil temporel est donnée en partie 3.5.6.

3.5.2 Mesure gravitaire

La deuxième mesure étudiée est la mesure gravitaire qui est la mesure la plus utilisée dans la pratique. Sa définition reprend celle de la mesure d'opportunités cumulées en ajoutant une fonction de friction du temps de trajet, qui rend une opportunité moins accessible lorsque le temps de trajet pour y accéder est plus élevé. Pour cette étude, le seuil temporel δ est gardé dans la définition de la mesure, pour garder une cohérence avec les autres mesures qui intègrent nécessairement ce seuil. De plus, la fonction de friction est paramétrée selon ce seuil, ce qui limite son impact. La mesure gravitaire est définie de la façon suivante :

$$A_G(i) = \sum_j (S_j f(t_{ij}))_{t_{ij}<\delta} \quad (23)$$

La définition de la fonction de friction est donnée en partie 3.5.6.

3.5.3 Mesure 2SFCA

La troisième mesure étudiée est la mesure par zone de captage en deux étapes (2SFCA). Cette mesure reprend la définition de la mesure précédente en ajoutant une variable représentant la compétition au commerce. La mesure est définie de la sorte :

$$A_{2SFCA}(i) = \sum_j \left(\frac{S_j f(t_{ij})}{V_j}\right)_{t_{ij}<\delta} \qquad (24)$$

Où :

$$V_j = \sum_k (P_k f(t_{kj}))_{t_{kj}<\delta} \qquad (25)$$

3.5.4 Mesure M2SFCA

La mesure modifiée de la mesure précédente vient corriger un enjeu qui peut être expliqué avec la Figure 3-5 (traduite de Tao et al., 2020) :

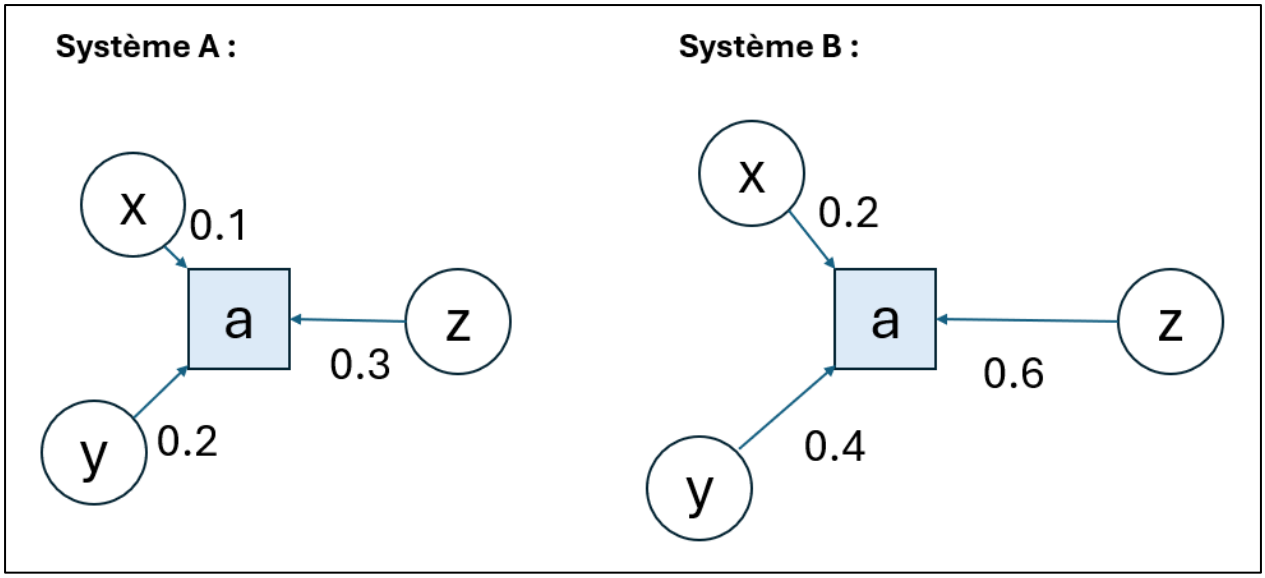


Figure 3-5 : Exemple numérique du biais de distance relative de la mesure 2SFCA (traduit de Tao et al., 2020)

Dans cet exemple, x, y et z sont des points origine (demande) et a est une opportunité. Les valeurs au-dessus des flèches représentent la friction d'accès à l'opportunité. L'accessibilité calculée au point x avec la mesure 2FSCA est la même dans le système A et dans le système B, de même pour les points y et z, alors que la friction du système B est le double de celle du système A. La mesure modifiée corrige ce biais en multipliant par la friction; la formulation est la suivante :

$$A_{2SFCA}(i) = \sum_j \left(\frac{S_j f(t_{ij}) f(t_{ij})}{V_j}\right)_{t_{ij}<\delta} \quad (26)$$

Où :

$$V_j = \sum_k (P_k f(t_{kj}))_{t_{kj}<\delta} \quad (27)$$

3.5.5 Origines des mesures d'accessibilité

Les mesures d'accessibilité basées sur la localisation sont calculées à partir d'un ensemble de points d'origine. Apparicio et al. (2017) définissent l'unité spatiale de référence comme l'entité spatiale pour laquelle l'accessibilité sera évaluée et cartographiée, et la méthode d'agrégation comme le choix du point représentant cette zone. Les unités spatiales de référence les plus courantes sont les secteurs de recensement et les aires de diffusion, en prenant le centroïde comme méthode d'agrégation la plus populaire. Cependant, ces choix peuvent entraîner des différences non négligeables sur les mesures finales d'accessibilité. Par exemple, Apparicio et al., 2017 étudient les variations d'accessibilité en comparant quatre méthodes d'agrégation et les différences vont jusqu'à 10% entre deux méthodes. Senegas et al. (2023) étudient l'accessibilité avec l'unité spatiale de référence la plus fine possible : le bâtiment.

Pour ce mémoire, le choix initial était de suivre cette méthode et d'étudier l'accessibilité au niveau du bâtiment, en prenant le centroïde comme méthode d'agrégation. Au vu du nombre de calculs de temps de trajet qu'implique cette méthode et le fait de les calculer de manière dynamique avec une faible résolution temporelle, cela n'a pas été possible. Le choix a été fait de garder cette unité spatiale de référence (bâtiment) mais d'en étudier qu'un échantillon.

Finalement, 1000 logements sont sélectionnés aléatoirement parmi la liste des unités d'évaluation foncière. Après retraitement des données, c'est-à-dire en supprimant les logements présents dans un même bâtiment, 961 logements sont sélectionnés dans l'Agglomération de Montréal. Le centroïde est la méthode d'agrégation, l'ensemble des 961 points d'origine des mesures d'accessibilité sont représentés sur la Figure 3-6 :

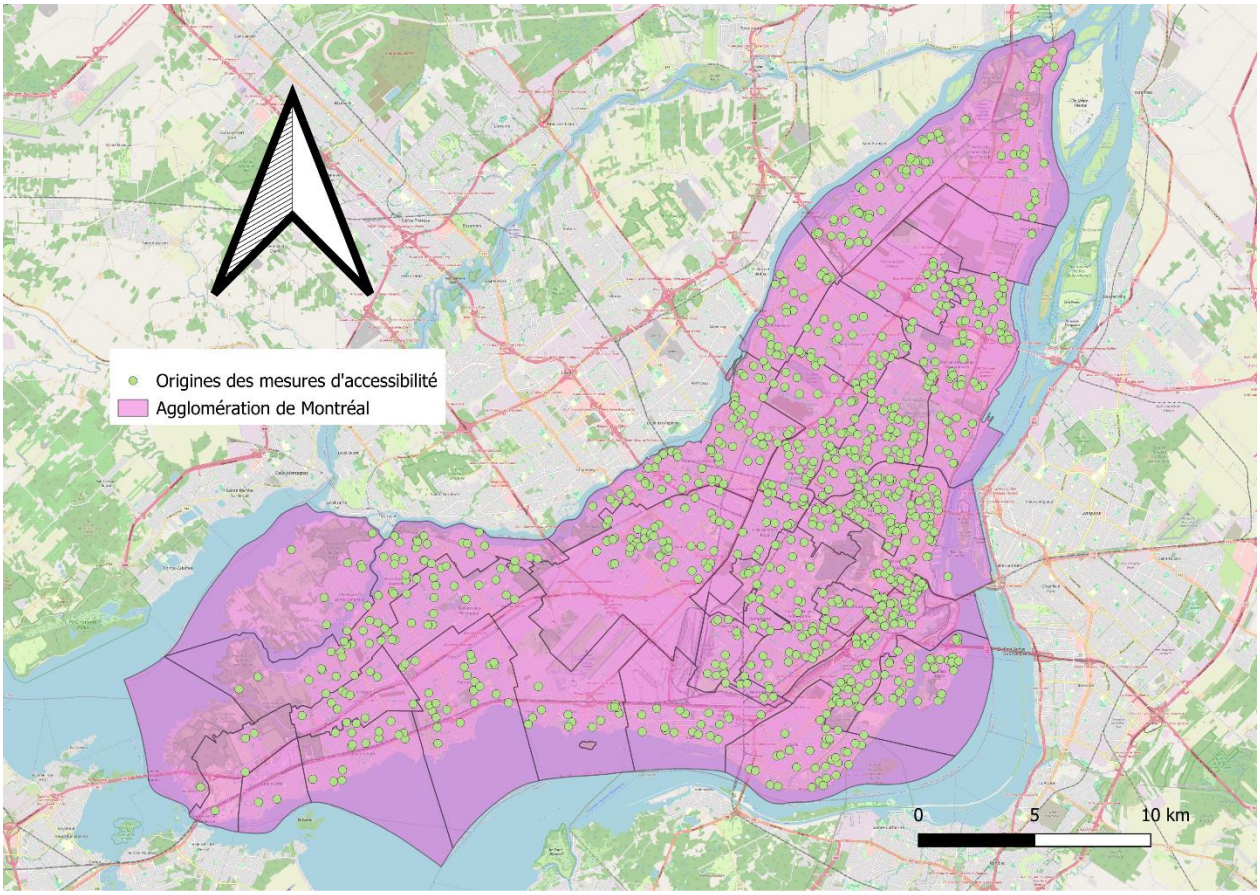


Figure 3-6 : Origines des mesures d'accessibilité

3.5.6 Coût du trajet

Dans ce mémoire, le coût du trajet est uniquement calculé à partir du temps de trajet. De nombreuses études revendiquent l'intégration d'autres paramètres (El-Geneidy et al., 2016; Giannotti et al., 2022) comme le prix du trajet ou le coût du trajet relativement au revenu. Pour ne pas compliquer les mesures, seul le temps de trajet est considéré ici. Cela est également cohérent avec la popularité de ce paramètre dans la littérature, notamment pour les études dynamiques de l'accessibilité.

Le temps de trajet est intégré différemment aux quatre mesures présentées précédemment. La mesure d'opportunités cumulées considère uniquement un seuil temporel à partir duquel les opportunités ne sont plus considérées accessibles alors que les trois autres mesures intègrent également une fonction de friction (ou fonction d'impédance) du temps de trajet. Le seuil temporel et la fonction d'impédance peuvent être intégrés de façon positive ou normative (Paez et al., 2012)

et ce choix impacte les mesures d'accessibilité. Pour ce mémoire, l'accessibilité est calculée de manière normative, c'est-à-dire sans se baser sur les comportements. La définition d'un seuil temporel relève généralement d'un choix arbitraire de l'analyste qui définit un temps qu'il considère acceptable pour accéder aux opportunités. Cependant, ce choix et la définition de la fonction de friction et de ses paramètres a un impact direct sur les mesures d'accessibilité, comme le montrent différentes études (Klar et al., 2023; Kapatsila et al., 2023). L'annexe A est consacrée à la définition du seuil temporel et de la fonction de friction qui seront fixés pour la suite de l'étude. Pour assurer une certaine cohérence entre la mesure par opportunités cumulées et les autres mesures d'accessibilité, la fonction de friction est calibrée sur le seuil temporel de la première mesure.

Finalement, d'après les résultats présentés, la fonction de friction choisie est la fonction gaussienne. Le seuil temporel sélectionné est 25 minutes : c'est un entre-deux qui permet une bonne corrélation avec les autres fonctions et un faible coefficient de variation. La fonction est présentée sur la Figure 3-7.

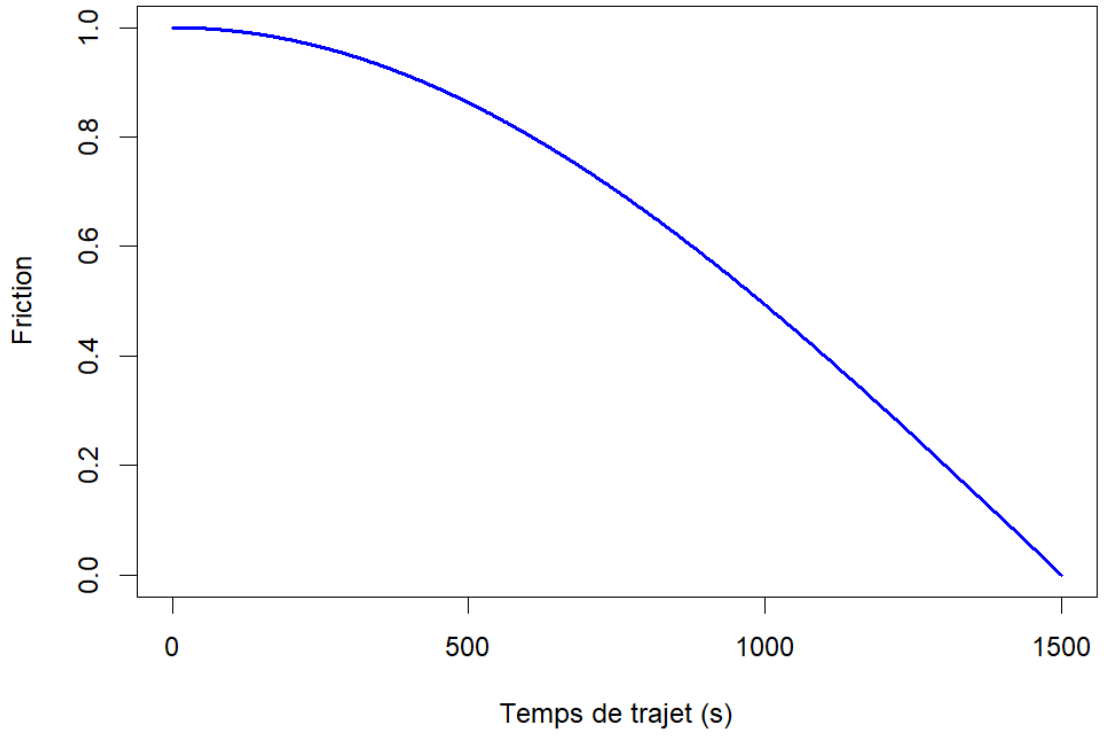


Figure 3-7 : Fonction gaussienne avec un seuil temporel de 25 minutes

3.6 Transport

Le transport apparaît dans les mesures d'accessibilité via le temps de trajet, qui est un paramètre important des mesures d'accessibilité : chaque mesure présente un seuil de temps de trajet δ qui définit les commerces accessibles depuis une origine, et certaines mesures incorporent directement ce temps de trajet au calcul à l'aide d'une fonction de friction.

Les temps de trajets en transport collectif sont calculés à partir de la plateforme Transition qui est présentée dans la partie suivante. La méthode détaillée de calcul de temps de trajet est donnée par la suite, ainsi que les considérations statiques et dynamiques.

3.6.1 Transition

Transition est une plateforme de planification de réseaux de transport collectif qui se définit ainsi (https://transition.city/#intro):

« Notre plateforme d'édition et d'analyse de réseaux de transport collectif est basée sur une approche modulaire, fournissant des outils performants qui permettent de créer ou de modifier des réseaux, de publier de l'information et de tester des scénarios. Des algorithmes novateurs effectuent plusieurs tâches de façon dynamique sans intervention humaine. Puisque nos outils sont flexibles, vous pouvez utiliser l'application en entier, ou simplement les modules qui répondent à vos besoins. »

Transition permet notamment l'importation de services de transport en commun, leur édition ou la création de nouveaux services. Les réseaux ainsi aménagés peuvent être analysés au sein de la plateforme grâce à différents outils. Les Figure 3-8 et Figure 3-9 présentent un aperçu de résultats possibles avec Transition, pour un point donné et des paramètres de calcul quelconques.



Figure 3-8 : Surface accessible en 30 minutes en transport en commun d'un point quelconque de l'Île de Montréal

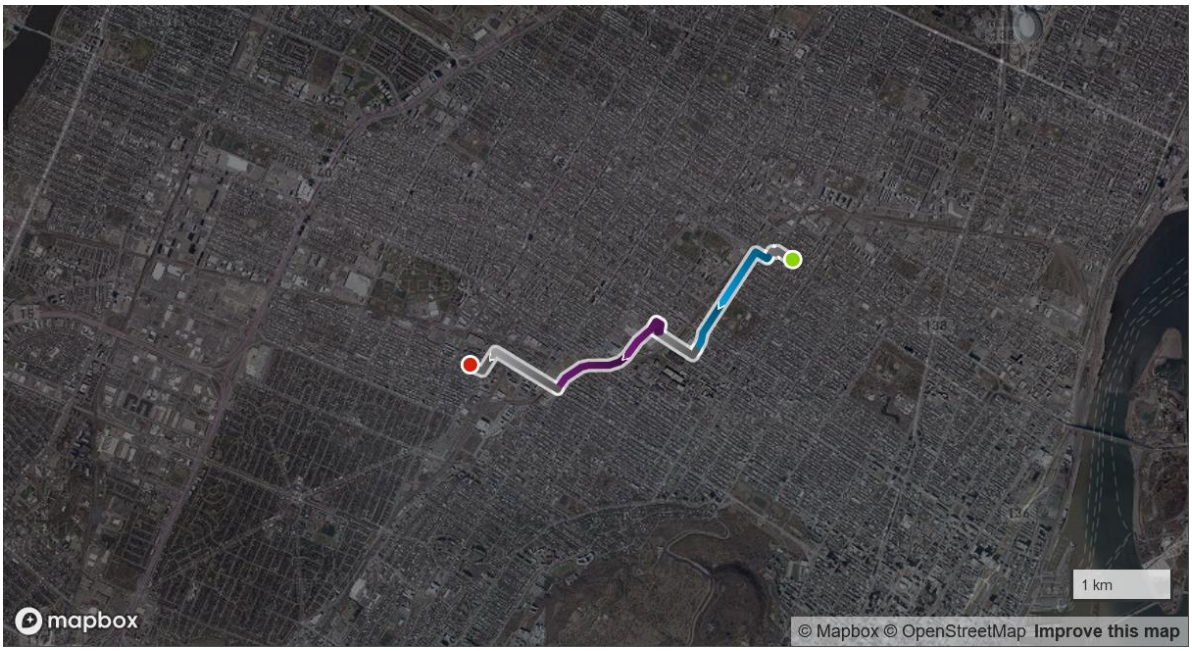


Figure 3-9 : Trajet en transport en commun de deux points quelconques de l'Île de Montréal



Figure 3-10 : Indicateurs et chemin d'un trajet en transport en commun entre deux points quelconques de l'Île de Montréal

Les fonctionnalités d'analyse utiles au présent mémoire sont les calculs de cartes d'accessibilité et de temps de trajet. Les parties suivantes présentent les deux étapes initiales permettant ces calculs.

3.6.1.1 Création d'agences

La première étape dans Transition est la création d'agences. Une agence est un regroupement de lignes et de services. Les trois agences créées pour cette étude sont les suivantes : DUPONT_STM_112023, DUPONT_STL_112023, DUPONT_RTL_112023 qui correspondent respectivement aux différents services proposés par la STM, la STL et le RTL sur la période de fin d'année 2023. Les services de la STL et du RTL sont nécessaires pour l'étude de l'accessibilité des habitants en bordure de l'île, qui peuvent avoir accès à des commerces à Laval ou à Longueuil.

La création de ces agences se fait directement à partir de l'importation des données GTFS dans Transition. Pour rappel, les données GTFS ont été téléchargées au mois de novembre 2023 pour la période en cours. Lorsque ces données sont importées dans Transition, la totalité des lignes et des services sont détectées et doivent être associés aux agences créées. Dans ce cas, la totalité des lignes et des services sont importés et c'est à l'étape suivante (création des scénarios) que la période d'étude est choisie (tous les services ne se chevauchent pas dans le temps).

3.6.1.2 Créations de scénarios

Une section de Transition est dédiée à la visualisation des agences (regroupement de lignes et de services), une deuxième présente l'intégralité des services et leurs lignes associées, et une troisième section permet le regroupement d'agences (ou de certaines lignes seulement) en spécifiant les services voulus, sous le nom de scénarios. Ainsi un scénario correspond à un réseau de transport collectif et aux horaires de ses différentes lignes.

Pour cette recherche trois scénarios ont été créés, chacun composé des trois agences décrites précédemment mais sur des périodes différentes. Le premier scénario regroupe les trois agences et leurs horaires en semaine (du lundi 30/10/2023 au vendredi 03/11/2023), le second correspond aux mêmes agences le samedi (04/11/2023) et le dernier scénarise le dimanche (05/11/2023). Ainsi, les trois scénarios forment la semaine du 30/10/2023 au 05/11/2023, qui était la seule période de chevauchement recomposable à partir des données GTFS des trois agences téléchargeables au moment de la création des scénarios (novembre 2023).

Il est désormais possible de calculer des cartes d'accessibilité ou des temps de trajet sur l'Île de Montréal en transport collectif, en choisissant au préalable un scénario.

3.6.2 Calcul du temps de trajet

Tous les temps de trajet en transport collectif sont calculés à l'aide de la plateforme Transition présentée précédemment, en choisissant le scénario correspondant à un jour de semaine (du lundi 30/10/2023 au vendredi 03/11/2023). Les paramètres de calcul utilisés sont les paramètres prédéfinis par la plateforme : temps minimum d'attente de trois minutes, temps maximum d'accès à l'origine et à la destination de 15 minutes, temps maximum d'accès lors des transferts de 10 minutes. Le temps de trajet maximum est de 30 minutes, conformément aux différents seuils temporels testés. Le temps maximum d'attente au premier arrêt est également de 30 minutes. Pour calculer un trajet à une heure de départ donnée, Transition calcule le temps de trajet le plus faible dans l'intervalle de 15 minutes avant à 15 minutes après l'heure de départ indiquée. C'est d'ailleurs ceci qui justifie le choix de mesurer l'accessibilité toutes les 15 minutes (en dynamique). Une méthode stratifiée ou aléatoire d'échantillonnage du temps n'est pas nécessaire (pour éviter les effets de fréquence (Stępniak et al., 2019)) et toutes les variations de service sur la journée sont prises en compte dans les mesures d'accessibilité.

Les trajets calculés avec Transition ne prennent pas en compte la possibilité d'effectuer les courts trajets intégralement à pied : tous les trajets calculés avec la plateforme incluent un temps de marche et obligatoirement un temps de transport collectif. Pour pallier cette erreur de paramétrage de Transition en amont des calculs et ne pas refaire tous les calculs, une méthode simple d'inclusion de la marche est proposée.

Les temps de trajet à la marche sont calculés à partir de la distance à vol d'oiseau (calculée à l'aide des coordonnées cartésiennes) à laquelle on applique une tortuosité de 1,4. La vitesse de marche utilisée est de 5 km/h. L'hypothèse est faite que seuls les trajets de moins de 15 minutes sont réalisables uniquement à la marche.

Finalement, le temps de trajet final considéré est le temps de trajet le plus court entre la valeur calculée par Transition et la valeur calculée à la marche par la méthode précédente.

3.6.3 Statique

En statique, les temps de trajet sont calculés selon la méthode précédente à un instant précis, en heure de pointe. Cette méthode est proposée selon ce qui se fait dans la littérature. L'heure choisie est 8:30 le matin.

3.6.4 Dynamique

En dynamique les temps de trajets sont calculés toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00, avec la méthode proposée précédemment.

Transition permet le calcul en parallèle de nombreux temps de trajets, à partir de fichiers textes présentant les attributs « coordonnées de départ », « coordonnées d'arrivée » et « date » (d'arrivée ou de départ). Les coordonnées de départ sont les coordonnées des 961 logements choisis comme origines des calculs d'accessibilité et les coordonnées d'arrivée sont les 376 commerces alimentaires. Les dates de départ sont les 60 instants entre 7 :00 et 22 :00, toutes les 15 minutes. Cependant, cela représenterait 21 702 720 calculs et Transition met environ une heure pour 15 000 calculs. De plus, les commerces considérés accessibles depuis une origine sont ceux se trouvant sous un seuil temporel delta. Ainsi, une méthode est proposée utilisant ce seuil et les cartes d'accessibilité Transition pour réduire le nombre de calculs de temps de trajet, en réduisant le nombre de paires origine/destination considérées.

Pour réduire le nombre de trajets calculé, l'idée est d'identifier pour chaque origine les commerces à moins de 25 minutes (seuil temporel maximum) au moins une fois dans la journée et de calculer les temps de trajets pour ces paires uniquement. Pour cela une fonctionnalité de Transition est utilisée, qui permet de tracer des zones d'accessibilité (surfaces accessibles) en un temps donné autour de points définis.

Cependant, étant donnée la variation des services de transport collectif, la zone accessible en un temps donné depuis un point quelconque varie fortement au cours de la journée. Cela est montré sur les Figure 3-11 et Figure 3-12.



Figure 3-11 : Zone d'accessibilité en 30 minutes à partir d'un point quelconque à 9 :00



Figure 3-12 : Zone d'accessibilité en 30 minutes à partir du même point à 9 :10

Ainsi, il n'est pas possible de former les paires origine/destination à partir de zones d'accessibilité calculées à un seul instant précis. De plus, comme le montrent les Figure 3-11 et Figure 3-12, les formes des zones d'accessibilité évoluent dans différentes directions selon l'heure de départ. Donc augmenter le temps limite des zones d'accessibilité ne permet pas d'identifier les variations de ces dernières au cours d'une journée. La meilleure méthode serait de tracer une zone d'accessibilité par origine toutes les 15 minutes. Cependant cela nécessite trop de temps de calcul, qui est justement le problème de base.

La méthode proposée part de l'hypothèse qu'en heure de pointe, en un lapse de temps de 60 minutes, un logement se voit offert l'intégralité du service de transport collectif disponible au cours d'une journée. Ainsi, six cartes d'accessibilité sont calculées pour chaque logement, une toutes les 10 minutes entre 9 :00 et 10 :00 du matin. Les cartes sont calculées en 35 minutes pour élargir la zone et saisir les variations aux 5 minutes pour ainsi ne manquer aucun commerce. Les paramètres de calculs sont les mêmes que pour les calculs de temps de trajet. Ces six cartes sont ensuite traitées dans QGIS pour former une unique zone par logement, censée inclure la totalité des commerces accessibles au cours d'une journée depuis ce dernier en 25 minutes. Une remarque sur l'intervalle

choisi peut être faite : il aurait peut-être été plus judicieux de choisir la période de 7 :00 à 8 :00 pour former les cartes d'accessibilité. La période considérée présente tout de même un service fréquent qui est estimé suffisant pour la définition de ces zones d'accessibilité, compte tenu de la marge prise. Ensuite, la fiabilité de la méthode n'est pas vérifiée et il est probable qu'à un instant donné pour une origine donnée, un commerce accessible en moins de 25 minutes ne soit pas considéré dans le calcul de l'accessibilité. Cette limite est considérée négligeable sur les mesures d'accessibilité résultantes.

Finalement, 25 640 paires origine/commerce sont retournées pour lesquelles les temps de trajets sont calculés toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00, avec la plateforme Transition.

3.7 Opportunités

Les opportunités choisies pour ce mémoire sont les commerces alimentaires, pour plusieurs raisons. Premièrement, les études d'accessibilité à l'alimentation sont très représentées dans la littérature et certaines études suggèrent de mieux intégrer le caractère spatiotemporel des composantes urbaines dans ces études (Farber et al., 2014b). En effet, l'accès à l'alimentation est un sujet important à étudier puisqu'encore trop de personnes vivent dans des déserts alimentaires. Deuxièmement, les commerces alimentaires présentent des caractéristiques intéressantes pour le présent mémoire, notamment en termes de dynamiques. Les heures d'ouvertures sont très variables et ces variations sont observables sur une journée. De plus, ces dynamiques sont simples à saisir et à incorporer au sein des mesures d'accessibilité dynamiques.

Le choix de ce type d'opportunités pour cette étude peut soulever différentes questions. Est-ce qu'il est pertinent de mesurer l'accès aux commerces alimentaires en transport collectif ? Est-ce qu'une mesure d'accessibilité aux commerces alimentaires doit prendre en compte les déplacements de la population (au travail, aux études, etc.) ? Dans les mesures 2SFCA et M2SFCA, la notion de concurrence est-elle adaptée aux commerces alimentaires? Toutes ces questions sont légitimes et montrent la compréhension de la notion d'accessibilité : la mesure doit être adaptée au contexte. Cependant cette recherche est portée sur les mesures d'accessibilité et les commerces alimentaires servent de contexte à l'étude.

Ensuite, la difficulté avec ces opportunités est leurs différences. Une mesure d'accessibilité cohérente mesure l'accessibilité à des opportunités semblables qui peuvent varier en termes d'accessibilité offerte (nombre de lits d'hôpitaux, surface de parcs, etc.). Les commerces

alimentaires sont peu semblables et offrent une accessibilité difficilement quantifiable. Les commerces alimentaires sélectionnés pour cette étude sont présentés dans la partie 3.3.2 sur les données OSM. Le choix est arbitraire et est basé sur des considérations personnelles : les commerces gardés sont jugés assez semblables et offrant des produits sains, accessibles et variés. La quantification ou pondération de ces commerces dans les calculs d'accessibilité est présentée dans la partie suivante.

Toutes les opportunités considérées sont présentées dans la partie 3.3.2. La Figure 3-13 montre également les opportunités mais avec un focus sur celles de l'île de Montréal, qui sont les plus représentées dans les calculs d'accessibilité.

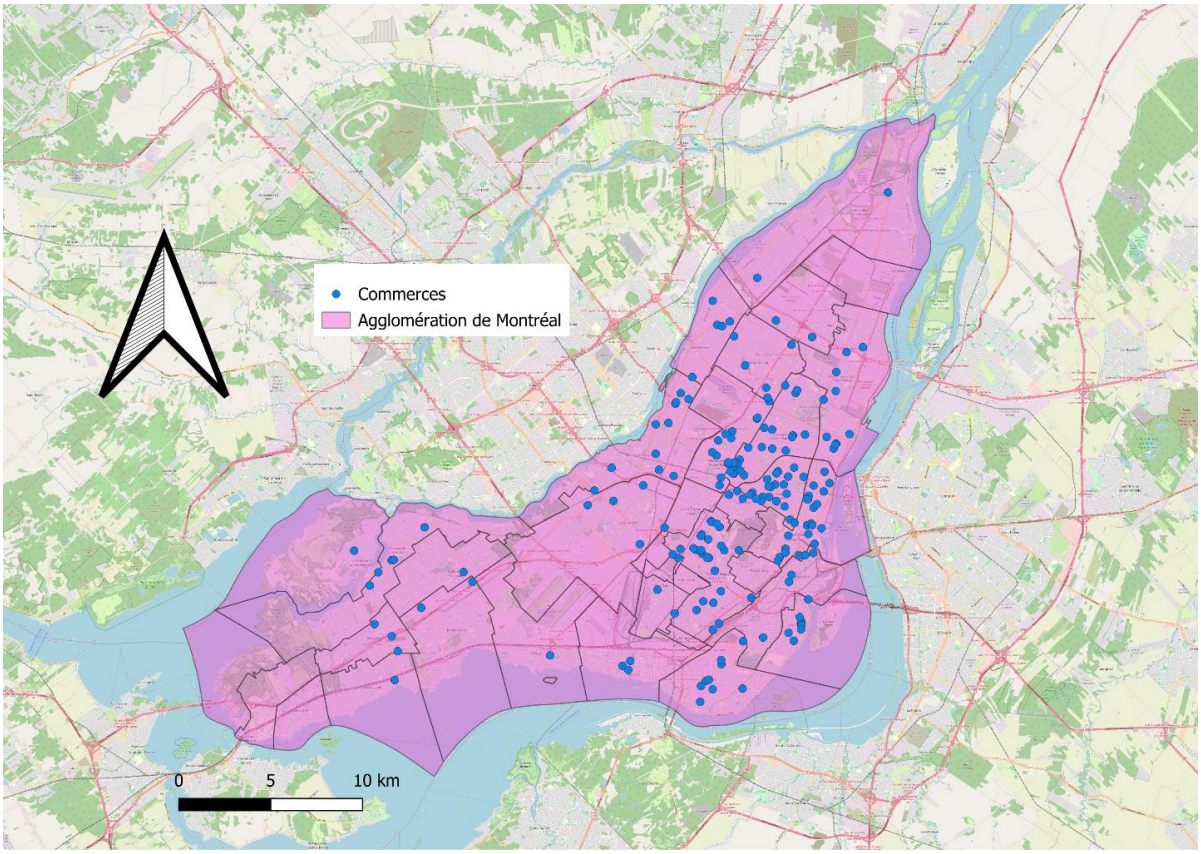


Figure 3-13 : Opportunités sur l'île de Montréal

3.7.1 Poids des commerces

Tous les commerces sont différents et n'offrent pas la même accessibilité. Premièrement, chacun ne présente pas la même diversité de produits, pas la même quantité de produits, pas les mêmes prix, donc pas le même accès à l'alimentation. L'hypothèse faite pour la pondération des

commerces est que leur valeur en termes d'accès à l'alimentation est proportionnelle à leur superficie. Cette partie présente les différents coefficients Sj (voir 3.5).

Les base de données des commerces a été formée à partir d'une extraction de données d'OpenStreetMap, qui pour la plupart sont des points. Aucun de ces points ne possède d'attribut « Superficie » et cette valeur n'est donc pas calculable dans un logiciel adapté. Différentes méthodes pour attribuer des superficies aux commerces sont présentées dans l'annexe B. La méthode retenue classe les commerces en quatre catégories (selon l'attribut d'extraction OSM, présentées en Tableau 3-7) et évalue la superficie moyenne d'un échantillon de commerces de chacune de ces catégories. Ces superficies moyennes sont ensuite attribuées à l'ensemble des commerces de chaque catégorie.

Tableau 3-7 : Catégories d'extraction OSM des commerces

Catégorie 1	"shop"="deli"
Catégorie 2	"shop"="greengrocer" & "shop"="farm"
Catégorie 3	"shop"="supermarket" \ {Catégorie 4}
Catégorie 4	"shop"="supermarket" & "name" = "IGA" | "L'Intermarché" | "Maxi" | "Metro" | "Provigo" | "PA" | "Super C" | "Walmart"

Le Tableau 3-8 présente la superficie attribuée à chaque catégorie de commerces :

Tableau 3-8 : Superficie attribuée aux commerces par catégorie

Catégorie	Superficie
1	113 m²
2	295 m²
3	1390 m²
4	4950 m²

3.7.2 Statique

Dans la majorité des études d'accessibilité, les variations temporelles de l'offre des opportunités ne sont pas considérées. Pour ce mémoire, lorsque les opportunités sont intégrées aux mesures d'accessibilité de manière statique, la superficie de chaque commerce est considérée accessible sur la totalité de la journée (7 :00 à 22 :00). C'est-à-dire que tous les commerces sont ouverts à chaque instant de 7 :00 à 22 :00. Dans ce cas-ci, la superficie totale disponible de commerces à un moment donné est de 2 266 878 m².

3.7.3 Dynamique

Dans la réalité, l'offre d'opportunités varie au cours du temps. Quelques études ont su intégrer ces variations aux mesures d'accessibilité (Boisjoly et al., 2016; Jarv et al., 2018). Pour ce mémoire, lorsque les opportunités sont intégrées aux mesures d'accessibilité de manière dynamique, les heures d'ouvertures des commerces sont considérées. En heure d'ouverture, la superficie totale du commerce est considérée accessible. Hors heure d'ouverture, le commerce est considéré complètement inaccessible.

Les heures d'ouvertures sont extraites d'OSM lorsqu'elles sont disponibles. Le format de ces données demande un long travail de retraitement pour qu'elles soient utilisables dans les calculs d'accessibilité. Cependant, seules un quart de ces données sont disponibles sur OSM. Les données manquantes sont récupérées manuellement sur internet, avec Google Maps comme principale source.

L'extraction de ces données est possible par l'intermédiaire d'un Google Maps API nommé API Places et de sa fonction Nearby Search, qui permet l'extraction de données à partir d'un point et d'un rayon d'extraction à définir. Cependant cette méthode est payante, la tarification est faite en fonction de la quantité de données extraites. Pour cette raison, cette fonctionnalité n'est pas utilisée et les données sont récupérées manuellement.

L'identification manuelle de ces données se base sur la liste des points extraits d'OpenStreetMap. Comme vu dans la partie précédente, l'extraction retourne un nombre conséquent de données (753 points dont 375 à l'extérieur de l'île) qui pour certains n'interviendront dans aucun calcul

d'accessibilité : seuls les commerces couplés au moins une fois dans la journée à un point origine (partie 3.6.4) sont traités.

Ensuite, chaque point de cette liste est associé au point correspondant sur Google Maps. Pour cela, les coordonnées et l'attribut correspondant au nom sont récupérées dans la liste des commerces accessibles (seuls trois cas sans nom ont été traités au cas par cas). Généralement, même si le point est parfois mal placé, il est possible d'identifier le commerce et d'extraire ses heures d'ouvertures. Mais il existe différents cas pour lesquels l'identification du commerce sur Google Maps n'est pas possible (changement de nom du commerce, pas de nom, point très mal placé). Ces difficultés sont traitées au cas par cas. Soit le commerce Google Maps est identifié grâce aux coordonnées (et ce malgré le nom), soit il ne l'est pas mais le nom du commerce permet une approximation des horaires selon le nom des commerces similaires.

Cette étape permet également une rétroaction sur la sélection par type OpenStreetMap : les éléments qui n'ont vraiment pas leur place dans la sélection sont supprimés (fromageries, Bulk Barn qui sont des commerces de noix et de confiseries, etc.) et les éléments mal catégorisés sont reclassés. Mais attention, cette étape de rétroaction n'est pas une étude approfondie des types de commerces et n'est pas partie intégrante de la méthodologie. Elle intervient seulement lorsque l'erreur est flagrante.

Au final, les heures d'ouvertures de chaque commerce pour tous les jours de la semaine sont disponibles et facilement intégrables aux mesures d'accessibilité : à chaque jour de la semaine, un commerce présente un attribut « heure d'ouverture » et un attribut « heure de fermeture » qui permet son intégration aux mesures selon l'heure du calcul. Le jour de la semaine choisi pour les calculs d'accessibilité est le mardi.

Les Figure 3-14, Figure 3-15 et Figure 3-16 présentent les commerces accessibles sur le territoire d'étude à différentes heures de la journée, un mardi.

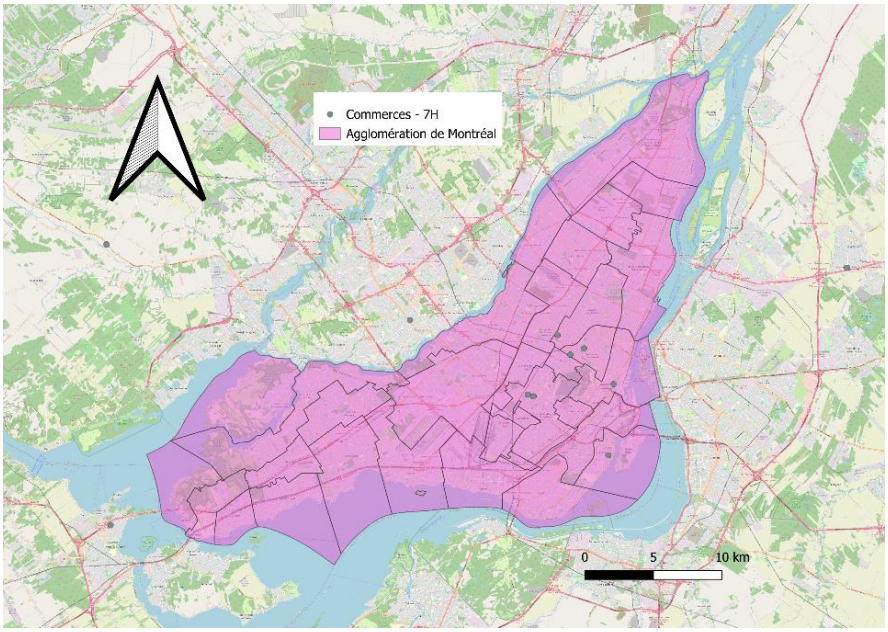


Figure 3-14 : Commerces accessibles à 7 :00

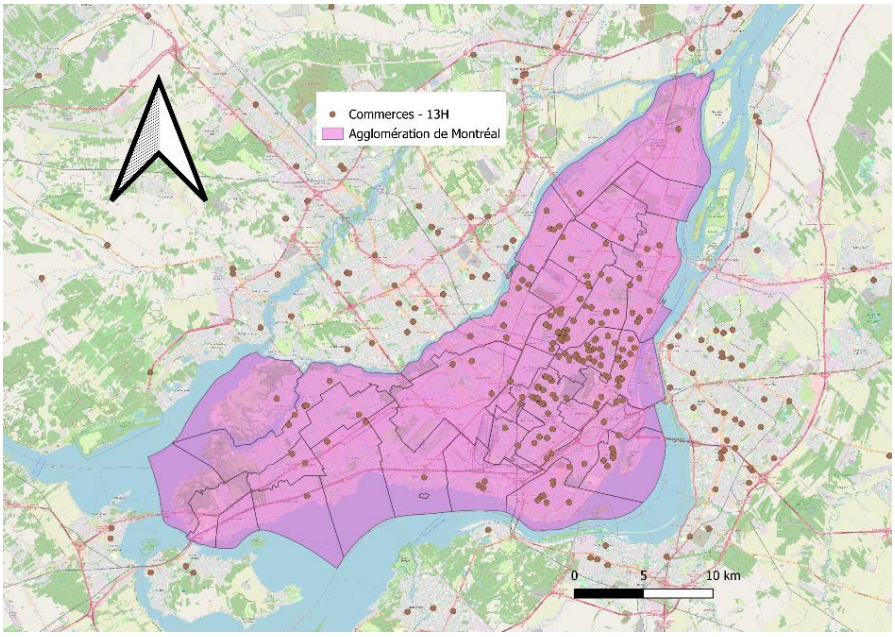


Figure 3-15 : Commerces accessibles à 13 :00

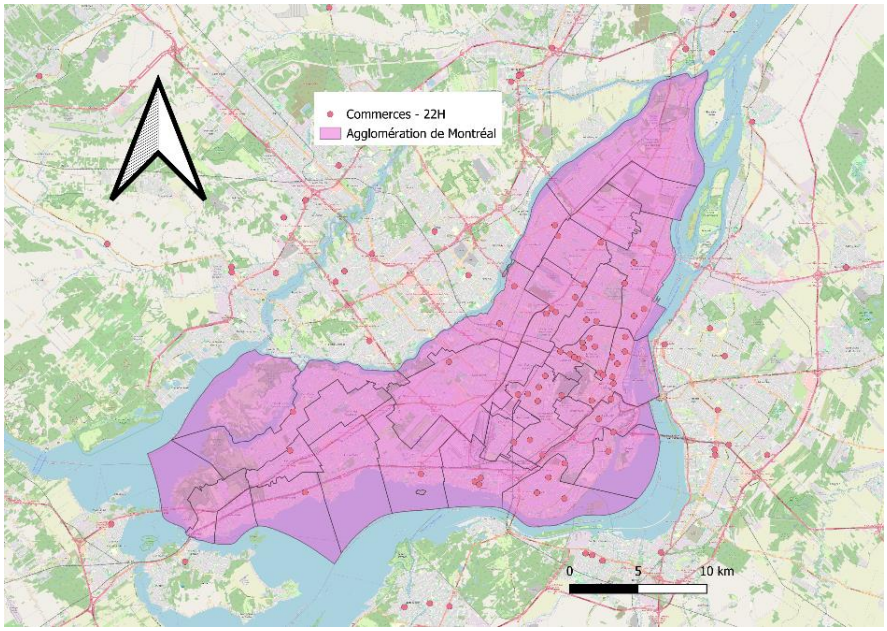


Figure 3-16 : Commerces accessibles à 22 :00

La Figure 3-17 montre la superficie totale disponible de commerce au cours de la journée (orange), en comparaison avec la valeur totale statique (bleu) de 2 266 878 m². La courbe orange n'atteint jamais la ligne bleue puisque certains commerces sont partiellement ouverts au cours de la journée, et d'autres sont fermés sur la journée considérée (mardi).

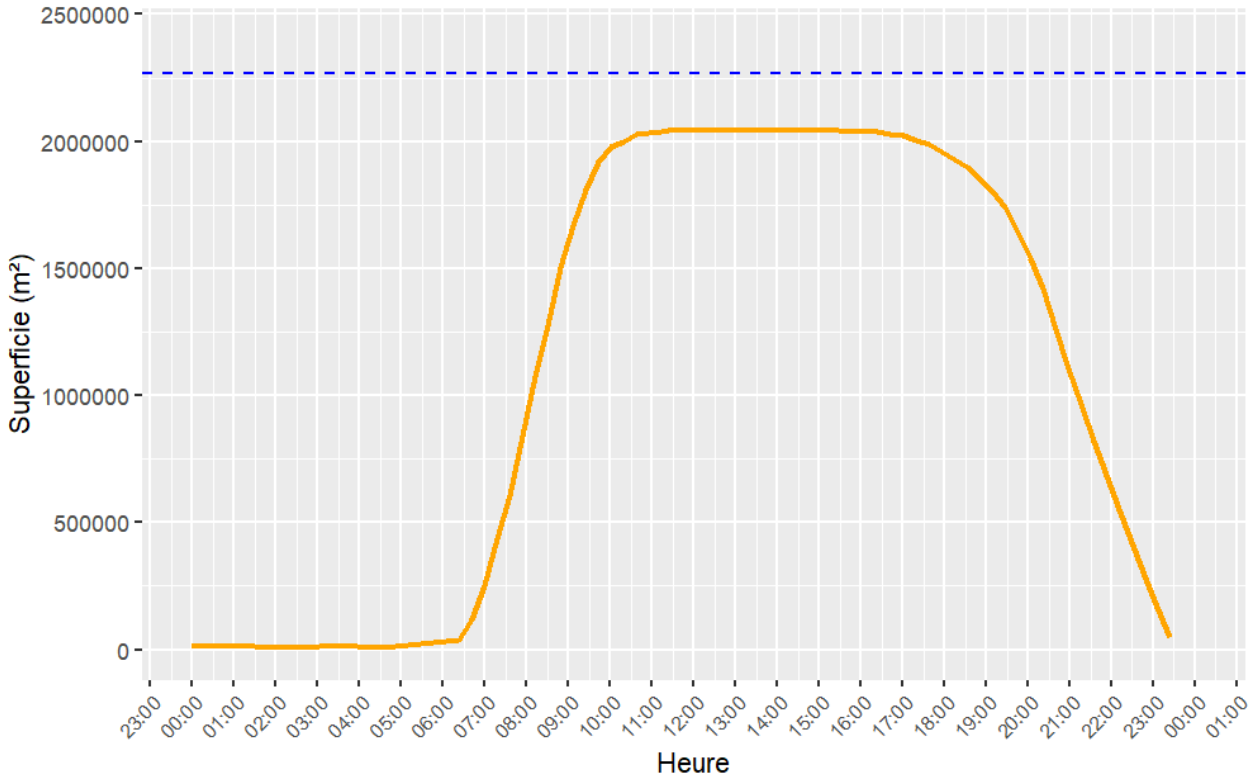


Figure 3-17 : Superficie totale disponible de commerces au cours de la journée

3.8 Population

La population est la composante urbaine qui bénéficie de l'accessibilité mais qui peut aussi avoir un impact sur les niveaux d'accessibilité mesurés, quand la concurrence est intégrée à la mesure. Ainsi, il est important d'intégrer correctement les individus.

3.8.1 Méthodologie

Les mesures d'accessibilité sont effectuées depuis 961 points (qui sont des logements) de l'île de Montréal. L'objectif ici est de passer d'une mesure de l'accessibilité des points à une mesure de l'accessibilité des personnes. Ainsi une méthodologie est proposée pour attribuer aux personnes un niveau d'accessibilité selon les mesures effectuées depuis les 961 points. Cette méthode s'inspire des travaux de Jarv et al. (2018) et de Mageau-Béland (2019).

L'idée générale est de tracer un diagramme de Voronoï à partir des 961 points d'origine des calculs d'accessibilité et d'attribuer un niveau d'accessibilité à chaque personne selon le polygone dans lequel elle se trouve. Cela revient à attribuer à chaque personne le niveau d'accessibilité du point (parmi les 961) le plus proche.

Pour cela, le territoire d'étude est séparé en quatre parties présentées sur la Figure 3-18. En effet, un diagramme de Voronoï est tracé selon des distances mais des limitations physiques peuvent être mises en jeu. Certaines îles sont volontairement exclues car aucun point origine ne s'y trouve.

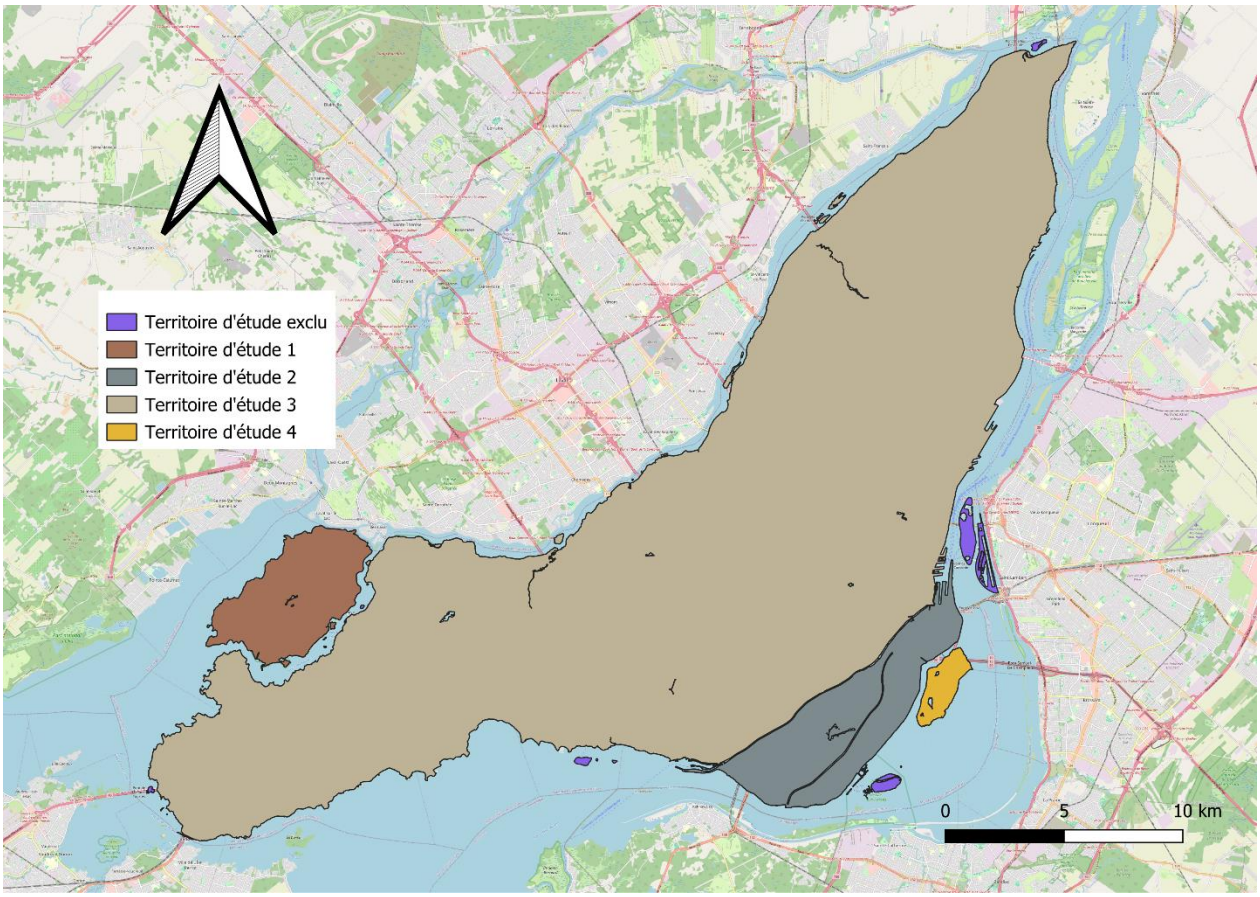


Figure 3-18 : Séparation du territoire selon les limites physiques

Finalement, quatre diagrammes de Voronoï sont tracés à partir des origines de chacune des quatre parties de l'agglomération. Le résultat est présenté sur la Figure 3-19.

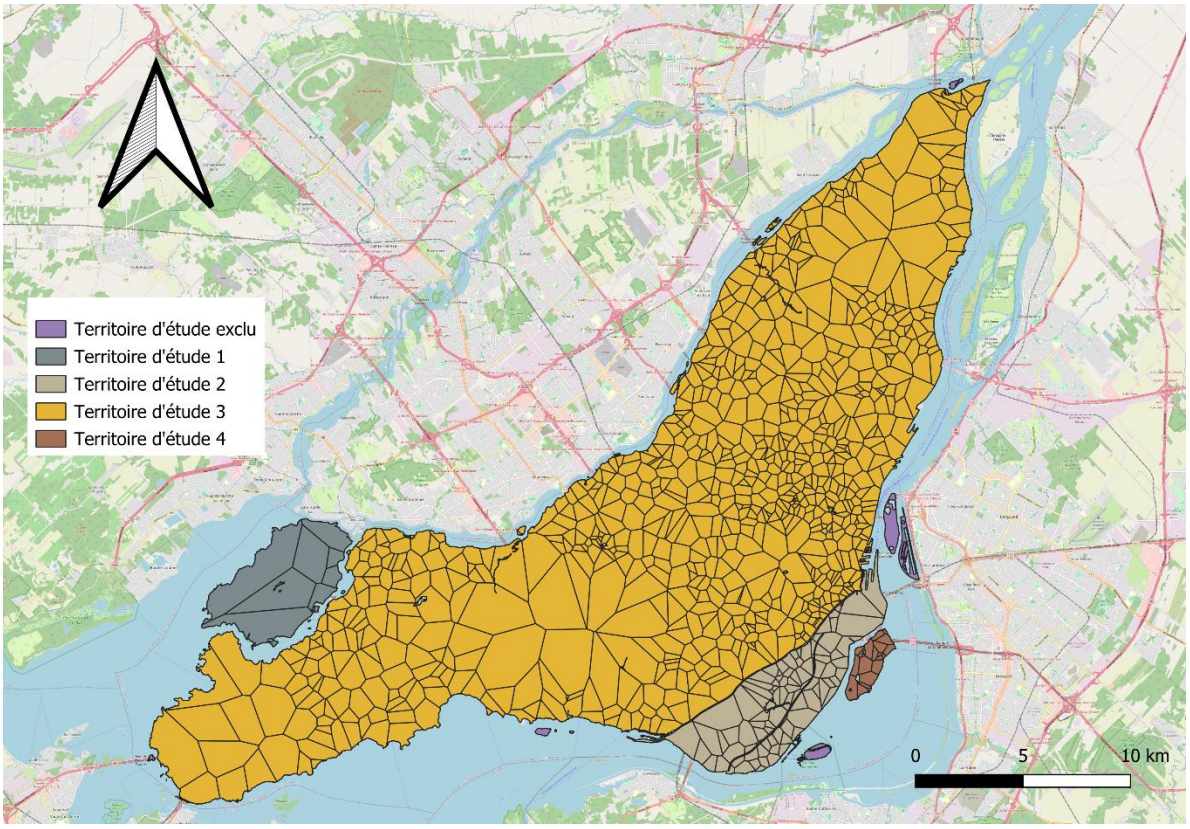


Figure 3-19 : Diagrammes de Voronoï sur les quatre territoires d'étude

Le niveau d'accessibilité de chaque personne est défini selon le polygone dans lequel elle se trouve. Les données mises en jeu (et leur traitement) pour localiser les personnes en statique et en dynamique sont présentées dans les parties suivantes. Selon l'analyse faite, les positions des individus sont traitées soit de manière agrégée (seul le nombre de personnes dans chaque polygone nous intéresse), soit de manière désagrégée (l'évolution des positions et de l'accessibilité de chaque individu est prise en compte).

A ce niveau-là, la pertinence du choix aléatoire des 961 logements dans la liste d'évaluation foncière peut être remise en cause. En effet, la distribution de l'accessibilité sur la population dépend de ce choix. Une méthode stratifiée de choix des origines aurait pu être plus appropriée. Par exemple, Jarv et al. (2018) quadrille son territoire d'étude et agrège la population dans ces carrés. Ou encore, Mageau-Béland (2019) trace des zones semblables aux alvéoles d'une ruche. Une autre façon aurait été de définir des points d'origine des mesures à partir d'une analyse de l'enquête OD, et de reproduire la méthode d'agrégation basée sur le diagramme de Voronoï : les

points d'origine sont placés en fonction des lieux de génération et d'attraction des déplacements, pour adapter le niveau de résolution des calculs aux positions des personnes. Cependant, le choix des origines des calculs a été fait à un moment du mémoire où ces questions ne se posaient pas. Finalement, ces points ont été gardés car ils constituent une bonne approximation des positions des personnes : une sélection aléatoire de logements retourne plus de points dans les lieux de forte densité de population. Malheureusement, les lieux qui attirent les personnes mais présentant peu de logements ne bénéficient pas du niveau de résolution adaptée, lorsque la population est considérée dynamique. Finalement, considérant ces remarques et les temps de calculs des temps de trajets mis en jeu, les points ont été gardés.

Pour conclure, la méthode présentée est également utilisée pour le calcul de la concurrence à un commerce. Pour rappel, un terme représentant la concurrence apparaît dans les mesures 2SFCA et M2SCA, qui est calculé ainsi :

$$V_j = \sum_k \left(\frac{P_k}{f(t_{kj})}\right)_{t_{kj}<\delta} \quad (28)$$

Le point j représente un commerce et les points k correspondent aux positions des personnes. Ces positions utilisées sont les 961 origines des mesures d'accessibilité, auxquelles est attribué un nombre de personnes selon la méthode précédente.

3.8.2 Statique

Dans la majorité des études d'accessibilité, la population est considérée statique et les positions des personnes sont obtenues à partir de la population de nuit.

Pour cette étude, lorsque la population est considérée statique : les positions des personnes sont calculées une seule fois au cours de la journée à partir de la population de nuit et considérées fixes entre 7 :00 et 22 :00.

Ces données de la population de nuit sont obtenues à partir de l'enquête OD 2018, qui est calibrée sur les données du recensement. Les données de l'enquête OD sont utilisées directement plutôt que les données du recensement pour être cohérent avec la partie « population dynamique ». Ainsi, tous les couples « feuillet » « rang » de l'enquête sont positionnés aux coordonnées du domicile, et « facpers » représente le nombre de personnes comptées à ces points. Pour rappel, chaque personne ainsi positionnée est attribuée à un polygone de Voronoï selon la méthode décrite précédemment.

Finalement, voici sur la Figure 3-20 la densité de population (de nuit) obtenue pour chaque polygone de Voronoï :

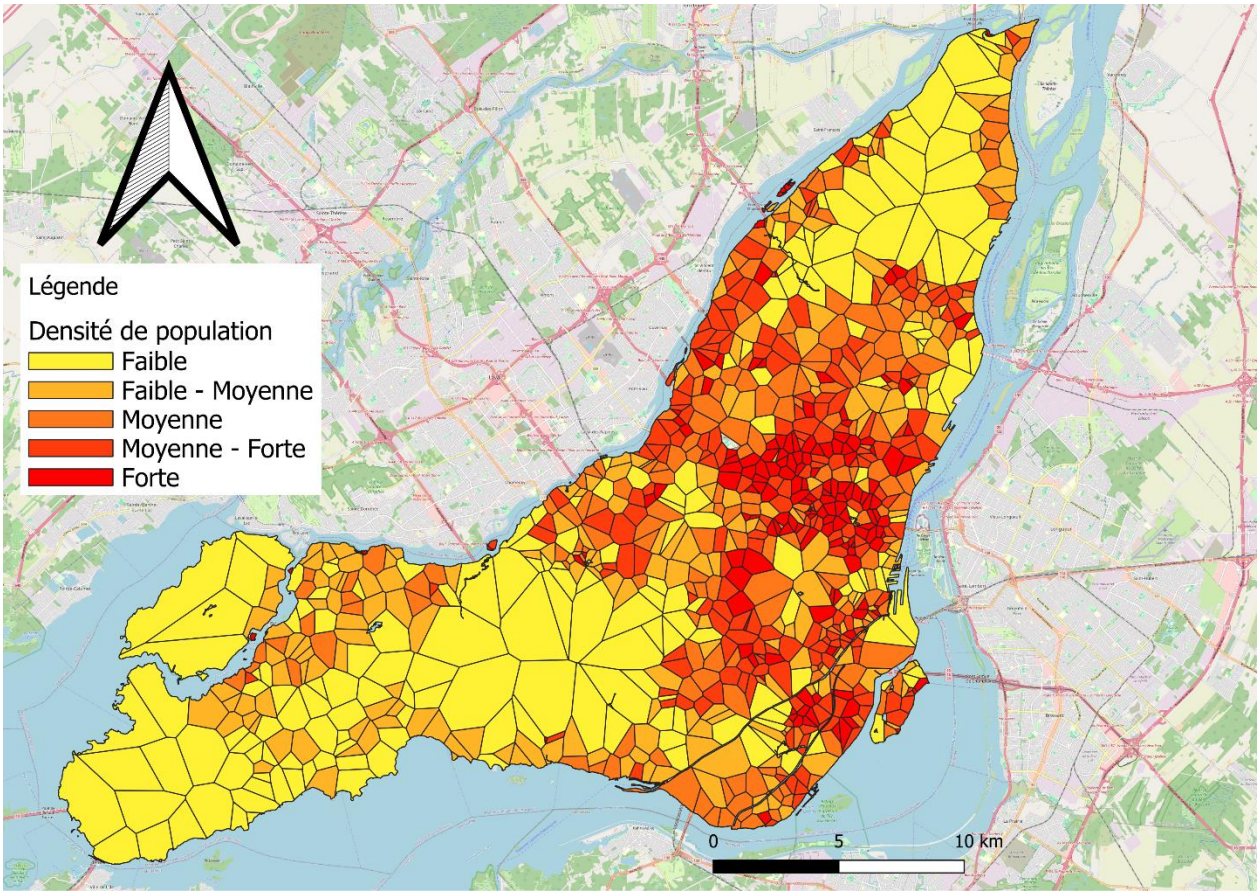


Figure 3-20 : Densité de population de nuit

3.8.3 Dynamique

Pour considérer la population dynamique, Jarv et al. (2018) suivent les personnes à partir de données GPS. Faute de données, la méthode proposée pour ce mémoire se base sur l'enquête OD 2018 et reprend le travail de Mageau-Béland (2019).

L'enquête OD est une matrice organisée autour des déplacements. La méthode de localisation des personnes se base sur cette matrice et la transforme pour obtenir une matrice organisée autour des individus. Cette nouvelle matrice conserve les attributs de l'enquête OD. Elle est créée à partir des coordonnées des déplacements (départ, arrivée), des heures des déplacements, des coordonnées des domiciles et en considérant les temps de trajet nuls (les individus sont toujours localisés à un point

donné et ne sont jamais en transit, il est possible de leur attribuer une localisation à chaque instant de la journée). La méthode est décrite sur la Figure 3-21 (inspirée de Mageau-Béland (2019)) :

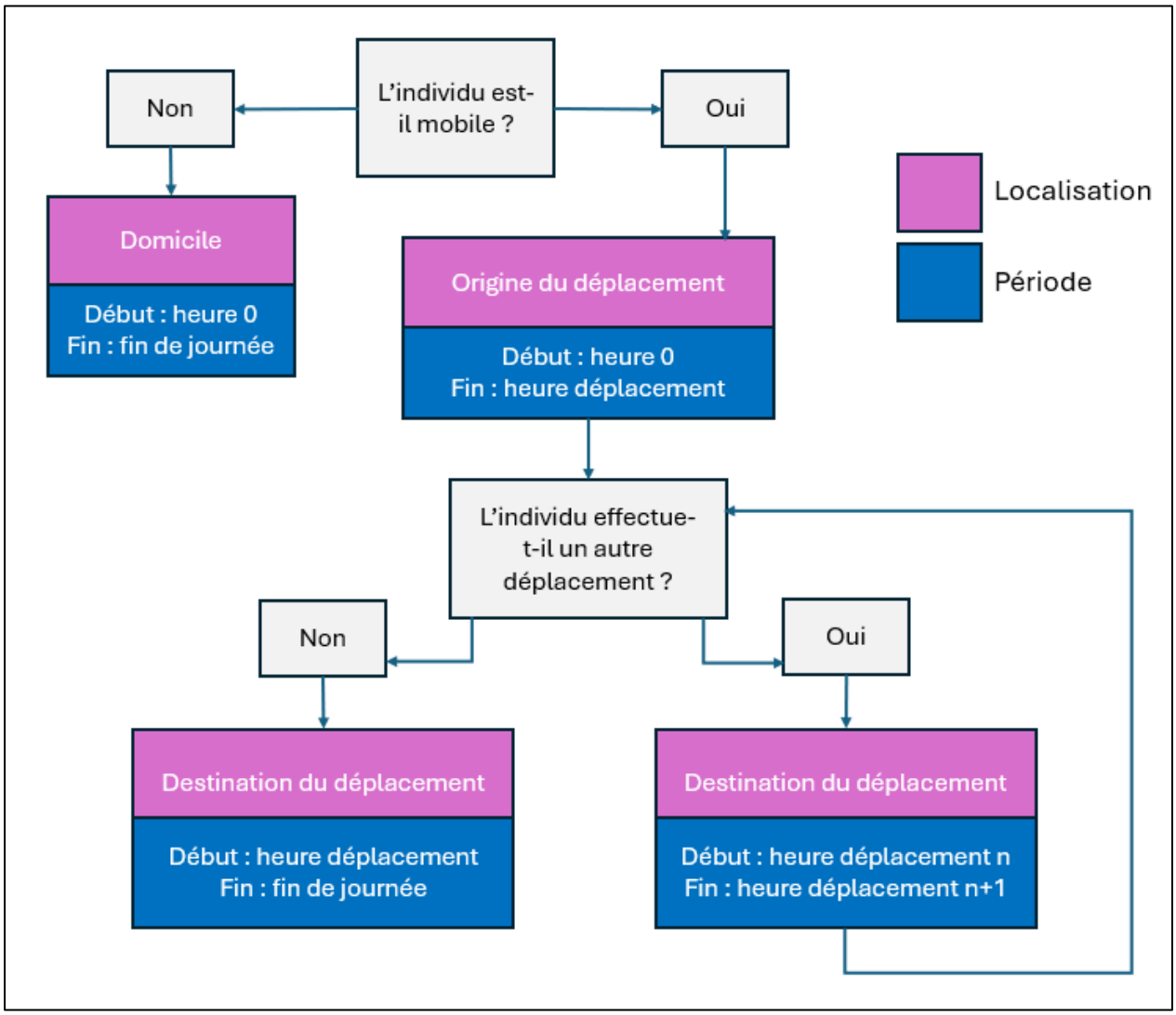


Figure 3-21 : Méthodologie de localisation de la population de jour (inspirée de Mageau-Béland, 2019)

Cependant, après quelques vérifications, des erreurs issues de l'enquête OD sont détectées et faussent la matrice de déplacement. Certaines heures de déplacements sont mal définies et cela fait que des personnes se trouvent nulle part ou à deux endroits à la fois. Ces erreurs sont peu nombreuses et sont corrigées manuellement, nécessitant quelques fois des choix arbitraires.

Une critique de la méthode peut être émise : des facteurs d'expansion sont considérés pour passer de l'échantillon de l'enquête à la population complète, mais sont-ils représentatifs à l'échelle des

polygones de Voronoï ? Cette question fait écho aux limites de la méthodologie précédemment identifiées, mais cette incertitude n'est pas considérée problématique dans le cas de cette étude.

Finalement à la fin de cette étape, chaque personne (et son facteur de pondération « facpers ») peut être localisée toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00. Pour rappel, chaque personne ainsi positionnée, à un instant donné, est attribuée à un polygone de Voronoï selon la méthode décrite précédemment.

Les Figure 3-22, Figure 3-23 et Figure 3-24 présentent l'évolution de la densité de population sur l'île de Montréal à différents instants de la journée.

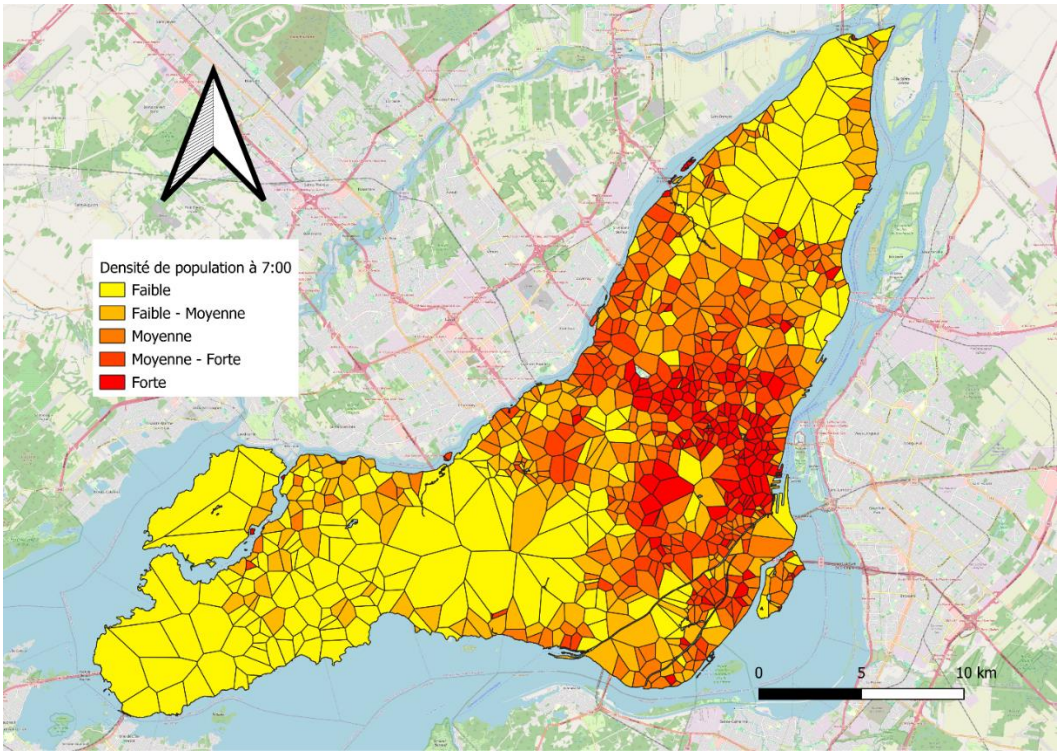


Figure 3-22 : Densité de population de jour à 7 :00

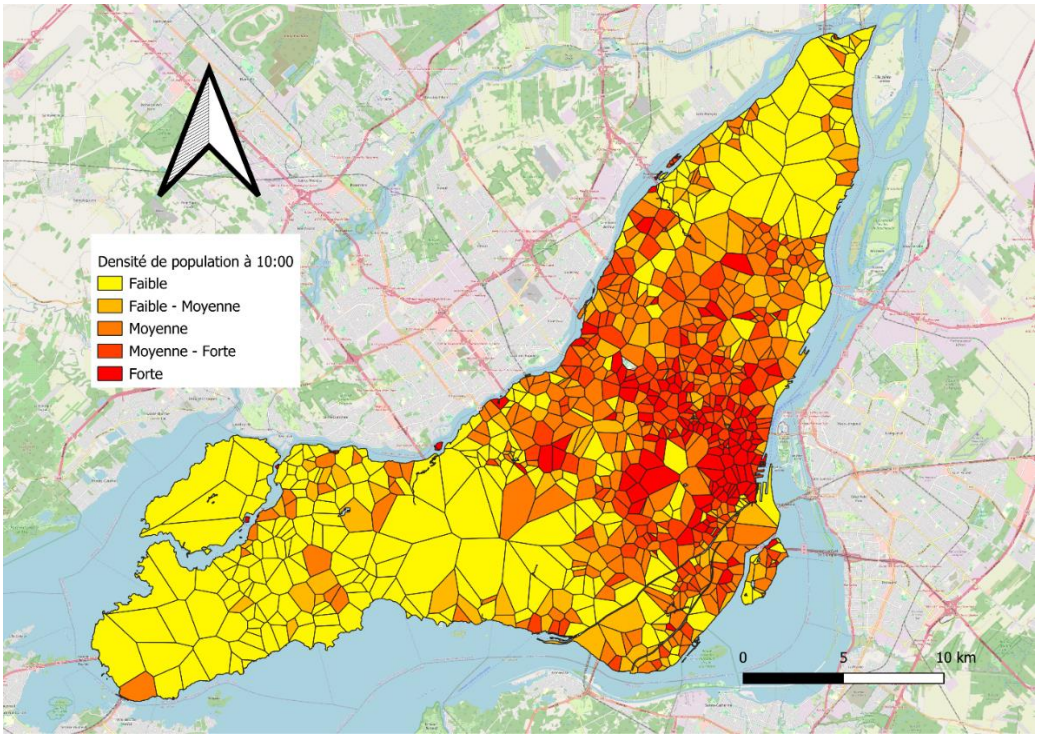


Figure 3-23 : Densité de population de jour à 10 :00

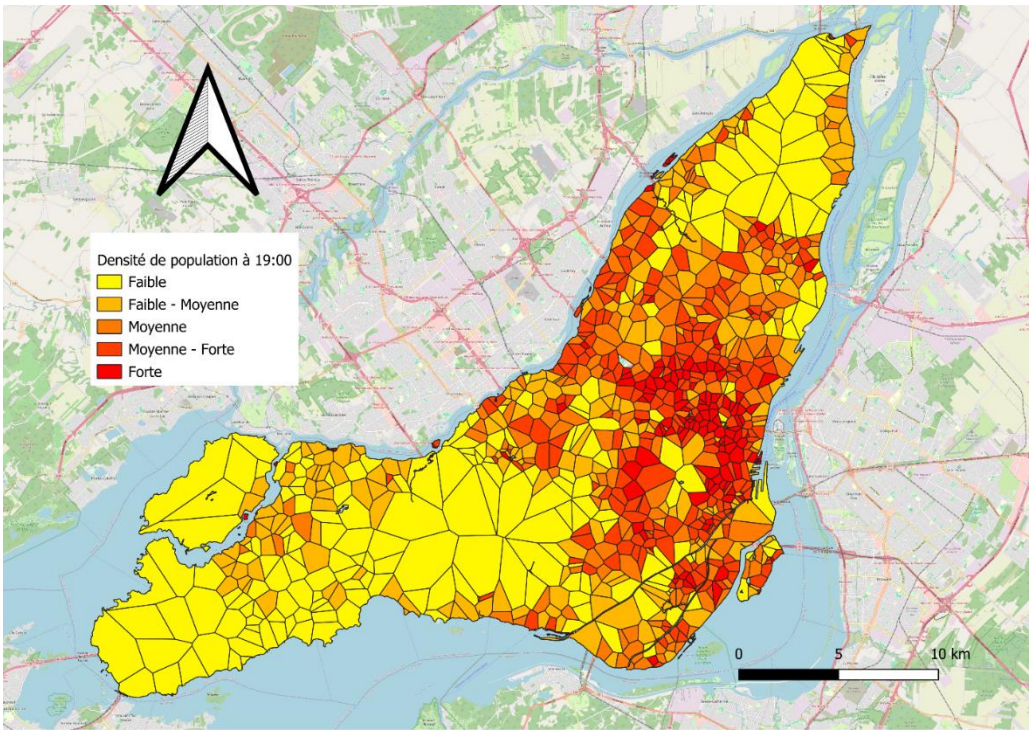


Figure 3-24 : Densité de population de jour à 19 :00

Quelques différences apparaissent même s'il est difficile de les observer sur ce type de document. Les cartes à 7 :00 et à 19 :00 sont les plus semblables, la carte à 10 :00 semble donner une répartition de la population plus étalée. De plus, ce type de représentation ne montre pas les mouvements de population et les évolutions des zones qui sont très denses tout au long de la journée.

Pour accompagner ces figures et bien rendre compte des mouvements de la population au cours de la journée, il peut être intéressant de montrer le profil d'accumulation de personnes au cours d'un jour moyen de semaine (Figure 3-25).

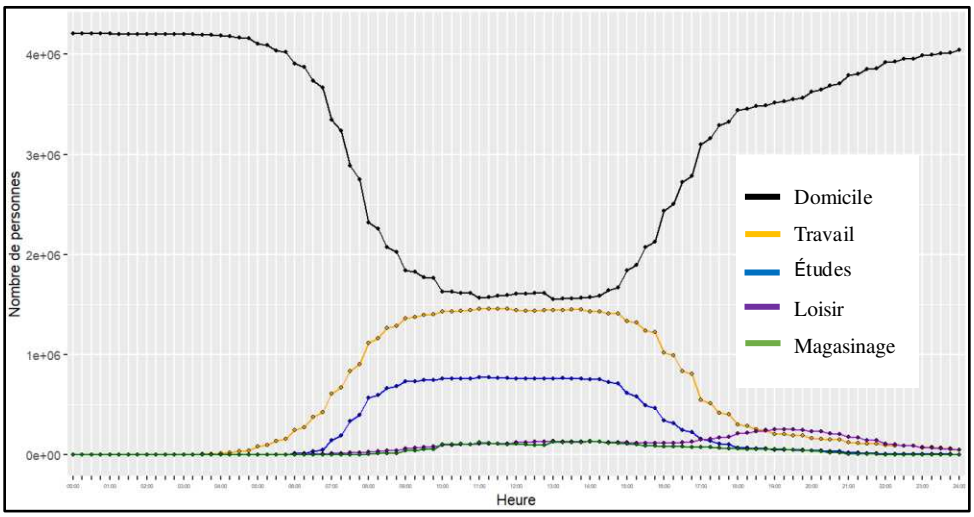


Figure 3-25 : Profil d'accumulation de personnes à travers un jour moyen de semaine (source : OD 2018)

La Figure 3-25 montre que, de 8 :30 à 15 :45, plus de la moitié de la population n'est pas à son domicile et justifie la pertinence de considérer les mouvements des individus dans les mesures d'accessibilité.

3.9 Analyse d'équité

Une évaluation de l'équité est menée à partir de l'accessibilité calculée dans les quatre cadres d'étude statiques-dynamiques et avec les quatre mesures d'accessibilité. Cette évaluation est effectuée de deux façons différentes. Premièrement, l'équité est évaluée horizontalement : tous les individus sont considérés égaux, la répartition de l'accessibilité sur la population est étudiée avec l'indice de Gini. Deuxièmement, l'équité est évaluée verticalement : les individus ne sont pas

considérés égaux, ce qui justifient plus de besoins pour les plus défavorisés. La répartition des ressources est étudiée avec le coefficient de corrélation de Spearman.

3.9.1 Équité horizontale

L'équité horizontale est étudiée avec l'indice de Gini. Pour rappel, l'indice de Gini se calcule à partir de la courbe de Lorenz. Cette courbe trace la part cumulée des ressources en fonction de la part cumulée de la population. La Figure 3-26 montre la courbe de Lorenz, la droite d'égalité parfaite et les différentes aires intervenant dans le calcul de l'indice de Gini.

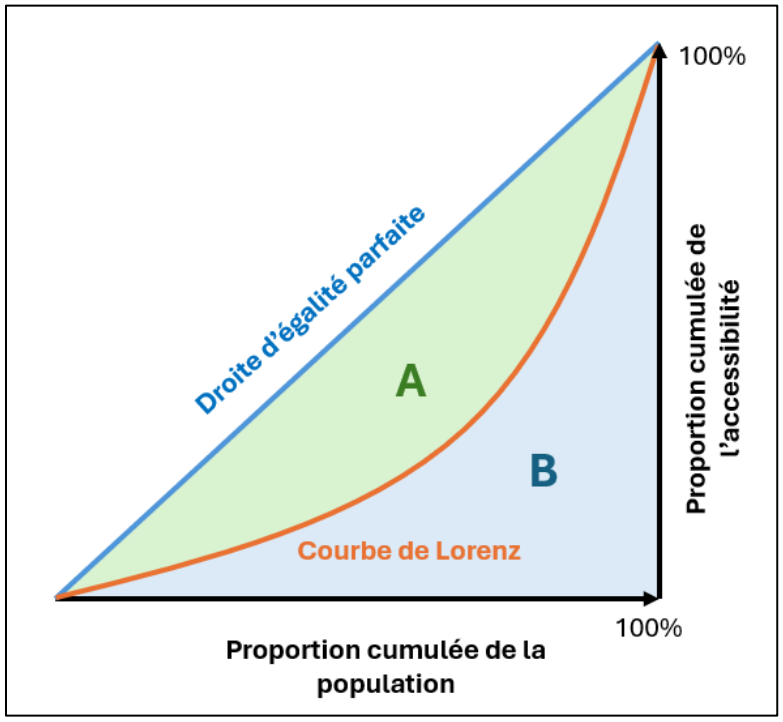


Figure 3-26 : Courbe de Lorenz

Pour rappel, l'indice de Gini se calcule à partir de l'aire sous la courbe de Lorenz (B) et de l'aire entre la droite d'égalité parfaite et la courbe de Lorenz (A), d'après la formule suivante :

$$Gini = \frac{A}{A+B} \quad (29)$$

Un indice de Gini égal à 0 indique une équité horizontale parfaite et un indice de Gini égal à 1 indique l'inverse.

Pour ce mémoire, l'indice de Gini est calculé sur l'ensemble du territoire d'étude toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00. Le calcul est assez simple puisque tous les individus sont considérés

égaux. En effet, même dans le cas le plus dynamique, le calcul de l'indice de Gini ne nécessite pas de désagrégation des résultats sur chaque individu, il est calculé de manière pondérée selon le nombre de personnes se trouvant à chaque instant dans les 961 polygones.

3.9.2 Équité verticale

L'équité verticale suggère que les individus les plus vulnérables doivent disposer du plus de ressources. Elle est étudiée ici avec le coefficient de corrélation de Spearman qui met en relation la vulnérabilité des individus et leur niveau d'accès aux ressources, il est défini ainsi :

$$r_s = \frac{Cov(R_{Acc,}R_{Vuln})}{\sigma R_{Acc}\sigma R_{Vuln}} \quad (30)$$

$R_{Acc}\ et\ R_{Vuln}$ sont respectivement le rang d'accessibilité et le rang de vulnérabilité. Les individus sont classés en six groupes de vulnérabilité (le groupe de rang 1 est le moins vulnérable tandis que le groupe de rang 6 est le plus vulnérable), pour lesquels l'accessibilité est étudiée puis classée de 1 à 6 (l'accessibilité de rang 1 est la moins bonne accessibilité). Les définitions de ces niveaux de vulnérabilité et d'accessibilité sont données dans les deux sous-parties suivantes.

Le coefficient de corrélation de Spearman varie entre -1 et 1, où 1 est un bon score d'équité verticale : les individus les plus vulnérables bénéficient du plus de ressources. A l'inverse, un score de -1 signifie que les personnes les plus favorisées ont un meilleur accès aux ressources. Un score de 0 n'indique aucune tendance particulière. Selon la méthode de définition des rangs d'accessibilité, le score d'équité verticale est calculé toutes les 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00, ou une seule fois pour la journée. De plus, étant donné que les individus sont regroupés par niveau de vulnérabilité, l'analyse se base sur des mesures d'accessibilité désagrégées sur chaque individu.

3.9.2.1 Groupes de vulnérabilité

Les groupes de vulnérabilité sont créés selon la méthode de Michaud (2019), proposée dans son mémoire « Méthode de diagnostic du niveau d'équité d'un réseau de transport collectif ». Comme soutenu par Litman (2017), la vulnérabilité est un phénomène cumulatif qui est proportionnel au nombre de facteurs de risque touchant un individu. Michaud (2019) développe ainsi un index de vulnérabilité à l'échelle de l'individu, basée sur les travaux à l'échelle zonale de Foth et al. (2013), Currie (2010) ou encore Fransen et al. (2015). Cet index de vulnérabilité attribut une valeur de 0.5 à 1.5 à différents facteurs de risque, cumulables, donnant un score de vulnérabilité à chaque

individu. Les facteurs de risque considérés et extraits de l'enquête Origine Destination (2018 pour cette recherche) sont les suivants : le statut de femme (1 point), l'âge de moins de 16 ans ou de 65 ans et plus (1 point), le statut de ménage à faible revenu (1 point), l'accès limité (0,5 point) ou nul (1 point) à l'automobile, la monoparentalité (1 point) et le statut de parent (1,5 point si l'enfant a moins de 5 ans, 1 point si l'enfant a entre 6 et 12 ans et 0,5 point si l'enfant a entre 13 et 18 ans).

Pour établir ces indicateurs, différentes hypothèses ont été établies. Premièrement, un individu est considéré être un parent s'il a plus de 18 ans et qu'il partage son ménage avec au moins un individu de moins de 18 ans. Ensuite, le compte de véhicules par ménage est calculé par personne de plus de 16 ans. Et enfin, le faible revenu est défini selon la Mesure de Faible Revenu (MFR) définie par l'Institut de la Statistique du Québec, comme étant la moitié du revenu médian. En 2019, ce seuil de faible revenu était de 23 086$ par an et concernait environ 11% de la population de plus de 16 ans. Le revenu par ménage de l'enquête OD est ajusté en revenu par personnes de plus de 16 ans. L'attribut « revenu » prend une valeur de 1 à 9 où 1 signifie que le ménage (ou l'individu après ajustement) gagne moins de 30 000$ par an. Finalement, les individus sont considérés à faible revenu lorsque l'attribut « revenu ajusté sur l'individu » est strictement inférieur à 1. Cela concerne 12% des individus de plus de 16 ans, comme ce qu'indique l'Institut de la Statistique du Québec.

Le groupe 1 regroupe les personnes ayant un score de vulnérabilité nul, le groupe 2 les personnes ayant un score de 0 à 1 exclu, et ainsi de suite jusqu'au 6ème groupe regroupant les personnes avec un score de vulnérabilité de plus de 4 points.

3.9.2.2 Rangs d'accessibilité

Les rangs d'accessibilité correspondent au classement des niveaux d'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité. Ce classement définit les rangs d'accessibilité qui sont ensuite comparés aux rangs de vulnérabilité selon le coefficient de Spearman. Ils sont donnés selon différentes méthodes. : la première méthode présentée se base sur la médiane de l'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité et les trois autres méthodes se basent sur le principe suffisantiste de justice distributive.

Certaines approches pourront sembler moins adaptées à l'étude de l'accessibilité aux commerces alimentaires. Cependant, l'accessibilité peut être mesurée à de nombreux types d'opportunités, les commerces alimentaires sont utilisés comme contexte au sujet d'étude principal qui est la comparaison de mesures d'accessibilités dynamiques.

Basés sur la médiane

Dans un premier temps, les rangs d'accessibilité sont basés sur les valeurs médianes d'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité. A chaque 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00, la médiane de l'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité est calculée. Puis à chaque instant ces valeurs sont classées pour attribuer à chaque groupe de vulnérabilité un rang d'accessibilité. Les coefficients de corrélation de Spearman sont calculés selon ces rangs et les rangs de vulnérabilité des groupes, à chaque instant. Le choix de la médiane plutôt qu'un autre indicateur comme la moyenne est un choix arbitraire.

Première approche suffisantiste

La seconde méthode de définition des rangs d'accessibilité inclut le concept suffisantiste. Ce concept suggère que toute personne doit avoir accès à une quantité minimale de ressources pour subvenir à ses besoins. Cette première approche suggère que cela doit être respecté à chaque instant de la journée.

Ainsi, un seuil minimal d'accessibilité est défini (différent pour chaque mesure, car elles n'ont pas la même unité) qui doit être dépassé à chaque instant. Pour chaque mesure d'accessibilité, le seuil de suffisance est défini comme étant la moitié de la valeur médiane de l'accessibilité, mesurée sur toute la population dans le contexte statique. La définition de ce seuil s'appuie sur la méthodologie de mesure du faible revenu (MFR) de l'institut de la statistique du Québec. Les seuils ainsi calculés sont relatifs à la distribution et ne représente pas nécessairement un niveau suffisant dans l'absolu. Pour les besoins de cette étude, les seuils calculés sont considérés comme reflétant une situation de suffisance absolue. La sensibilité des résultats au choix de ce seuil n'est pas testée.

Ainsi, à chaque instant, les parts de personnes de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès au minimum défini (selon la mesure) sont calculées. A chaque instant, le groupe de vulnérabilité ayant le meilleur niveau d'accessibilité est le groupe dont une plus grande part de sa population a accès à ce seuil minimal. Les rangs d'accessibilité sont calculés à chaque instant de la journée, tout comme le coefficient de Spearman.

L'exclusion sociale des individus est induite par une combinaison de facteurs socio-économiques et de facteurs liés au transport (Lucas, 2012), ainsi les personnes les plus vulnérables et les personnes en-dessous d'un seuil de suffisance d'accessibilité sont les plus susceptibles d'être

socialement exclues. Ces approches suffisantistes regardent si la distribution des ressources permet à un maximum de personnes vulnérables de subvenir à leur besoin et d'ainsi éviter l'exclusion sociale, ou non.

Deuxième approche suffisantiste

La deuxième approche suffisantiste considère que chaque personne doit avoir accès à un minimum de ressources pendant une durée minimale de la journée. La période de la journée définie arbitrairement est l'intervalle de 16 :00 à 20 :00.

Les seuils de suffisance utilisés sont les seuils présentés dans la sous-partie précédente. Pour cette approche, les parts de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès à ce minimum d'accessibilité sur l'entièreté de la période définie sont calculés. Le meilleur rang d'accessibilité est attribué au groupe dont la plus grande part de la population bénéficie de cet accès. En effet, cela signifie que la répartition des ressources permet à ce groupe de subvenir à ses besoins sur une période critique de la journée. Le coefficient de Spearman est ensuite calculé une fois entre ces rangs et les rangs de vulnérabilité.

Troisième approche suffisantiste

La dernière approche suffisantiste considère que l'accessibilité se cumule au cours de la journée et que cette somme d'accessibilité cumulée doit être supérieure à un certain seuil pour chacun (l'accessibilité moyenne sur la journée d'un individu doit être supérieure à un seuil minimal). Ce seuil minimal est défini comme étant égal à 60 fois les seuils présentés précédemment (correspondants aux 60 instants de la journée considérés). Encore une fois les parts de la population de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès à ce minimal sont calculés pour définir les rangs d'accessibilité est ainsi calculer le coefficient de corrélation de Spearman.

Une variante de cette approche est également testée où une valeur maximale d'accessibilité peut être sommée à chaque instant. En effet, cette méthode considère qu'à partir d'un certain seuil de ressources disponibles, l'ajout de ressources supplémentaires n'affecte plus l'individu. Ce seuil maximal est défini comme étant deux fois la valeur d'accessibilité médiane mesurée en statique. Cela peut également être vu comme une méthode pour ne pas fausser la moyenne de l'accessibilité mesurée sur la journée avec des valeurs trop élevées qui ne profitent pas réellement à l'individu.

CHAPITRE 4 RESULTATS

Les résultats sont organisés en trois parties : la première présente l'accessibilité totale mesurée, la seconde concerne la distribution de l'accessibilité sur la population et dans le temps et la dernière correspond aux résultats des évaluations d'équité.

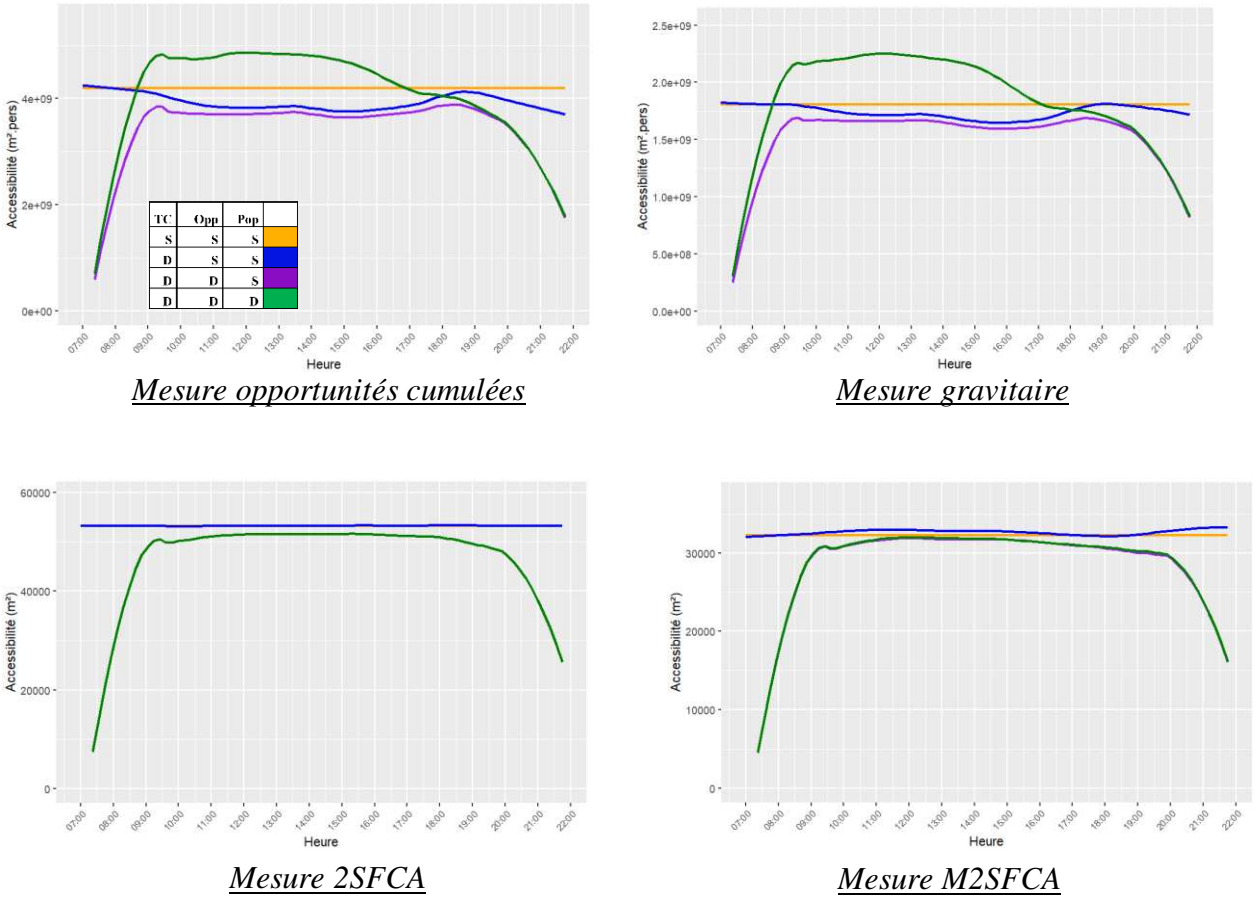
4.1 Accessibilité totale mesurée

Cette première partie des résultats s'intéresse à l'accessibilité totale mesurée avec les différentes mesures dans les différents contextes dynamiques. Cette analyse est particulièrement pertinente dans le cas de planifications basées sur des objectifs d'accessibilité à atteindre pour la population, où des valeurs de référence peuvent être définies. De plus pour les évaluations d'équité, l'accessibilité est définie comme le bénéfice ou la ressource à distribuer sur la population. Puisque chaque mesure d'accessibilité est dans une unité de mesure différente et que les valeurs seuils peuvent dépendre de ces unités (traduisant une réalité physique), cette première comparaison se concentre sur les différences entre les différents cadres statiques-dynamiques. L'objectif est de montrer qu'avec une même mesure d'accessibilité, la quantité d'accessibilité disponible à la population varie selon les considérations dynamiques des composantes urbaines. L'indicateur utilisé est la mesure de l'accessibilité totale concentrée par l'ensemble de la population, qui est finalement équivalente à l'accessibilité moyenne.

La légende, qui est utilisée pour toute la suite, est donnée ci-dessous. La lettre « S » signifie que la composante est considérée statique alors que la lettre « D » signifie que la composante est intégrée dynamiquement à la mesure. Cette table sera régulièrement reproposée, pour ne pas perdre le fil.

Tableau 4-1 : Légende pour les figures d'accessibilité totale mesurée

	TC	Opportunités	Population	Couleur
SD1	**S**	**S**	**S**	
SD2	**D**	**S**	**S**	
SD3	**D**	**D**	**S**	
SD4	**D**	**D**	**D**	



Mesure opportunités cumulées

Mesure gravitaire

Mesure 2SFCA

Mesure M2SFCA

Figure 4-1 : Accessibilité totale mesurée

La première mesure d'accessibilité est obtenue en intégrant les trois composantes urbaines de façon complètement statique et correspond aux lignes jaunes sur les différents graphiques. Les dynamiques du service de transport sont ensuite ajoutées pour obtenir les courbes bleues. L'accessibilité totale mesurée par la mesure d'opportunités cumulées et la mesure gravitaire baisse considérablement lorsque les variations de service sont prises en compte. Cet effet est plus important hors heure de pointe, car la fréquence de passage des transports est plus faible à ces moments-là et certaines lignes express ne sont pas en service. Au contraire, la mesure 2SFCA n'est pas sensible à cet ajout et cela s'explique par le biais des distances relatives présentées en partie 3.5.4. La version modifiée présente elle une légère augmentation de l'accessibilité totale mesurée hors heure de pointe. Cela s'explique probablement par le fait que la baisse de la fréquence désavantage plus la concurrence que l'accès direct à l'opportunité, résultant en une meilleure accessibilité pour certains individus.

Ensuite les dynamiques des opportunités sont ajoutées, c'est-à-dire que les heures d'ouverture des commerces sont considérées. Cette intégration est représentée par les courbes violettes. En intégrant ces dynamiques aux mesures d'accessibilité, toutes estiment une forte baisse d'accessibilité totale en début et fin de journée, et une légère baisse au cours de la journée. Cet effet logique est la conséquence directe des variations de surface de commerces disponibles. Peu de commerces sont ouverts en début et en fin de journée, et quelques commerces sont fermés au cours de la journée.

Les mouvements de la population sont ensuite considérés dans les mesures d'accessibilité pour donner la courbe verte. Pour la mesure d'opportunités cumulées et pour la mesure gravitaire, la prise en compte de ces mouvements de population résulte en une accessibilité totale mesurée globalement plus élevée. Cela est justifié par le fait que les individus ont tendance à se déplacer au cours de la journée vers des zones plus denses en opportunités et en services de transport. Ainsi, cet effet est plus important en milieu de journée lorsque les individus ne sont pas à domicile. Au contraire, les mesures d'accessibilité totale obtenues avec les mesures de captage en deux étapes ne sont pas impactées par l'ajout des dynamiques de la population. Cet effet est dû à la double intégration de la population dans le calcul de la concurrence et dans le calcul de l'accessibilité totale. Cet indicateur n'est pas pertinent dans ce cas-là.

4.2 Distribution de l'accessibilité

La première partie s'intéressait à la quantité d'accessibilité directement mesurée alors que cette partie s'intéresse aux quantités d'accessibilité mesurées les unes par rapport aux autres. En effet, les mesures d'accessibilité peuvent être utilisées pour identifier les zones de faible accessibilité (déserts alimentaires par exemple), les individus défavorisés ou les périodes critiques de la journée. Ainsi, ce sont les mesures relatives entres les zones, les individus et les périodes de la journée qui sont le sujet de cette partie. L'objectif est de voir si la répartition de l'accessibilité sur les individus au cours de la journée est équivalente avec les différentes mesures, dans les différents contextes statiques-dynamiques. Pour cela, deux indicateurs sont utilisés qui sont le coefficient de corrélation de Spearman et le coefficient de variation. Le coefficient de corrélation de Spearman est pertinent puisqu'il est basé sur les rangs des valeurs mesurées (rangs au sein des individus ou rang dans le temps) et permet donc d'évaluer les équivalences de répartition de l'accessibilité. Cependant, ce

coefficient ne traduit pas des écarts entre les différentes valeurs, ainsi le coefficient de variation est également utilisé.

4.2.1 Coefficient de corrélation de Spearman

Le coefficient de corrélation de Spearman est calculé selon la formule suivante :

$$r_s = \frac{Cov(R_X, R_Y)}{\sigma R_X \sigma R_Y} \qquad (31)$$

Où r_s est donc le coefficient de corrélation de Spearman et R_X et R_Y sont les rangs des valeurs qui constituent les vecteurs X et Y.

Les coefficients de corrélation calculés dans cette partie sont calculés à partir des rangs d'accessibilité des individus. Ainsi, un coefficient de corrélation est calculé à chaque 15 minutes entre 7 :00 et 22 :00. Les résultats sont présentés ainsi, ou moyennés sur la journée. De plus, lorsque la population est dynamique, seuls les individus présents sur le territoire d'étude pour l'intégralité de la journée sont considérés dans les calculs pour éviter les 0 lorsqu'ils sortent du territoire. Un croisement entre ces individus et la population de nuit est également effectué pour permettre les calculs des coefficients de corrélation de Spearman, sur les mêmes individus.

4.2.1.1 Entre les contextes statiques-dynamiques

Premièrement, les coefficients de corrélation de Spearman sont calculés à partir des niveaux d'accessibilité obtenues avec chaque mesure, dans les différents contextes statiques-dynamiques. Le Tableau 4-2 donne ces coefficients de corrélation moyennés sur la journée :

Tableau 4-2 : Coefficients de corrélation de Spearman moyens entre cadres SD

		OC		
		SD2	SD3	SD4
OC	SD1	0,91	0,87	0,65
	SD2		0,96	0,71
	SD3			0,74

		Gravitaire		
		SD2	SD3	SD4
Gravitaire	SD1	0,94	0,91	0,66
	SD2		0,96	0,70
	SD3			0,73

		2SFCA		
		SD2	SD3	SD4
2SFCA	SD1	0,87	0,82	0,52
	SD2		0,95	0,60
	SD3			0,65

		M2SFCA		
		SD2	SD3	SD4
M2SFCA	SD1	0,91	0,86	0,55
	SD2		0,95	0,61
	SD3			0,66

Les résultats colorés en bleu sont les résultats les plus pertinents puisqu'ils correspondent aux corrélations obtenues dans deux contextes statiques-dynamiques différents d'une seule composante dynamique. Pour les quatre mesures d'accessibilité, l'ajout des dynamiques de la population (passage de SD3 à SD4) induit les plus grandes différences de distribution de l'accessibilité (plus faible coefficient de corrélation). Ces résultats sont logiques puisqu'en se déplaçant les individus se retrouvent dans des zones où l'accessibilité n'est pas identique à celle mesurée sur leur lieu de domicile. Les deux mesures 2SFCA sont les plus sensibles à l'ajout de la population dynamique sur les différences de répartition de l'accessibilité, bien qu'elles présentaient peu de différence d'accessibilité totale mesurée entre les deux contextes dynamiques (SD3 et SD4).

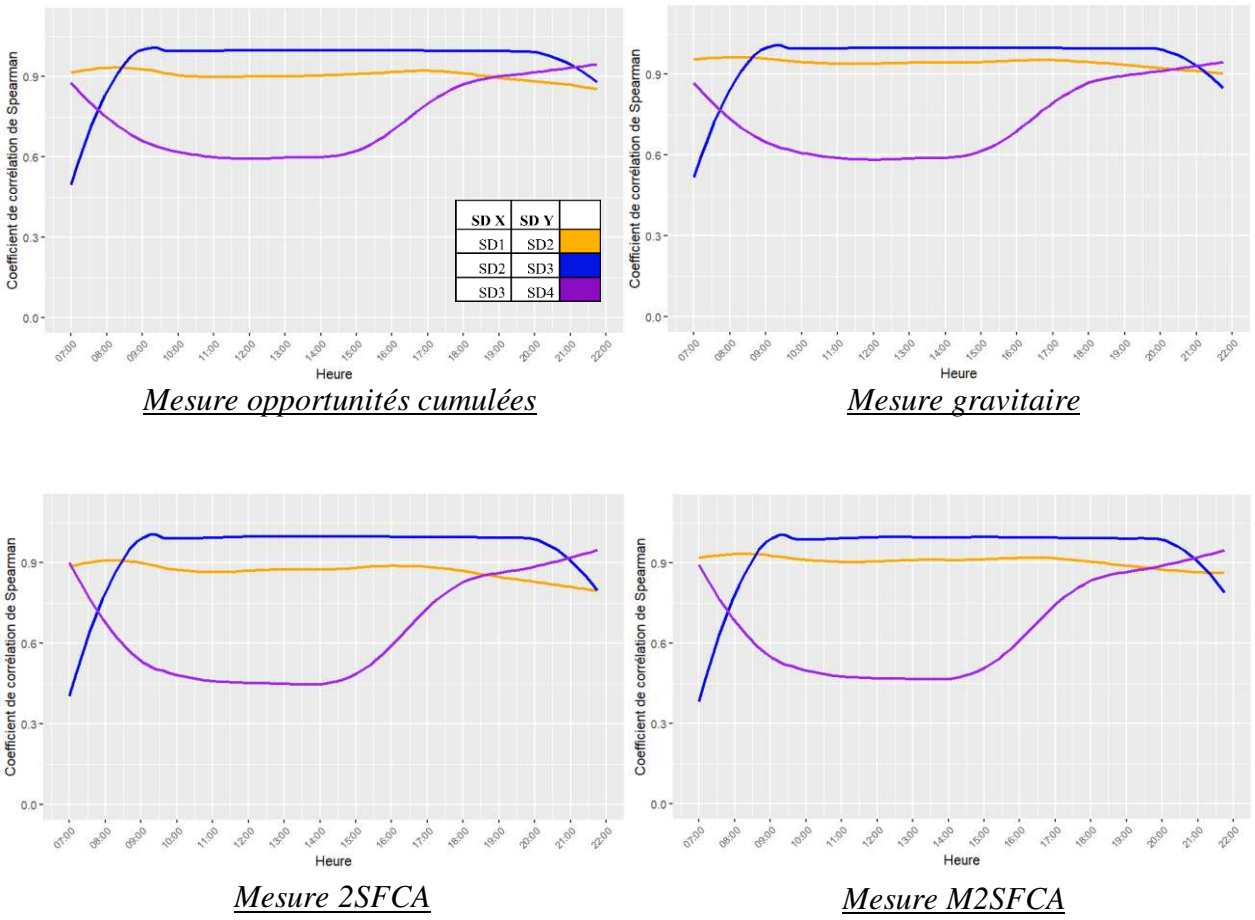
Les ajouts des heures d'ouverture des commerces (SD2 à SD3) sur les différentes mesures d'accessibilité donnent un coefficient de corrélation assez élevé (0,95 à 0,96), soit une distribution de l'accessibilité sur les individus équivalente dans les deux contextes d'études. Ces coefficients sont également élevés entre les contextes SD1 et SD2 (ajout du transport dynamique), bien qu'il vaille 0,87 pour la mesure 2SFCA.

Finalement, les ajouts des différentes composantes dynamiques induisent de grandes différences de répartition de l'accessibilité sur la population. Les corrélations de Spearman entre les mesures complètement statique et complètement dynamique vont de 0,66 à 0,52. Les deux mesures 2SFCA sont les plus sensibles à ces ajouts dynamiques.

Les coefficients de corrélation calculés avec une mesure d'accessibilité dans deux contextes statiques-dynamiques différents d'une composante (moyennes en bleues dans le Tableau 4-2), sont présentés en détail au cours d'une journée sur les graphiques suivants. La légende est donnée dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Légende pour les coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les cadres SD

SD X	SD Y	Couleur
SD1	SD2	
SD2	SD3	
SD3	SD4	



Mesure opportunités cumulées

Mesure gravitaire

Mesure 2SFCA

Mesure M2SFCA

Figure 4-2 : Coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les cadres SD

Les résultats confirment les observations précédentes sur les coefficients de corrélation moyennés sur la journée, mais apportent des détails. Les coefficients de corrélation entre les contextes statiques-dynamiques SD1 et SD2 sont plutôt constants au cours de la journée tandis qu'ils varient fortement avec les autres ajouts dynamiques. En effet, le coefficient de corrélation relativement élevé en moyenne, pour les différentes mesures, entre les contextes statiques-dynamiques SD2 et SD3 (ajout des heures d'ouverture des commerces) est en fait très faible en début de journée. A cette période, la répartition de l'accessibilité est faite sur les populations proches des commerces ouverts et évoluent à l'ouverture des autres. Enfin, les coefficients de corrélation mesurés entre les contextes statiques-dynamiques SD3 et SD4 sont très faibles au cours de la journée mais très élevés en début et fin de journée. Ces résultats sont logiques mais les corrélations en journée sont encore plus faibles que ce que la moyenne laissait entrevoir.

Finalement, le choix d'intégration des composantes dynamiques induit de grandes différences de répartition de l'accessibilité sur la population. Une étude souhaitant identifier les grands gagnants et grands perdants de l'accessibilité ne doit pas négliger ces aspects et préciser les différentes hypothèses, notamment sur les positions des personnes, aboutissant aux résultats. Les quatre mesures réagissent de la même façon à ses ajouts dynamiques, même si les mesures 2SFCA sont légèrement plus sensibles.

4.2.1.2 Entre les mesures

Ensuite, les coefficients de corrélation de Spearman sont calculés à partir des niveaux d'accessibilité obtenues dans chaque contexte dynamique, avec les différentes mesures. Le Tableau 4-4 donne ces coefficients de corrélation moyennés sur la journée :

Tableau 4-4 : Coefficients de corrélation de Spearman moyens entre les mesures d'accessibilité

		SD1		
		Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD1	OC	0,94	0,76	0,68
	Gravitaire		0,87	0,84
	2SFCA			0,97

		SD2		
		Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD2	OC	0,94	0,78	0,72
	Gravitaire		0,87	0,86
	2SFCA			0,97

		SD3		
		Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD3	OC	0,94	0,80	0,74
	Gravitaire		0,88	0,87
	2SFCA			0,97

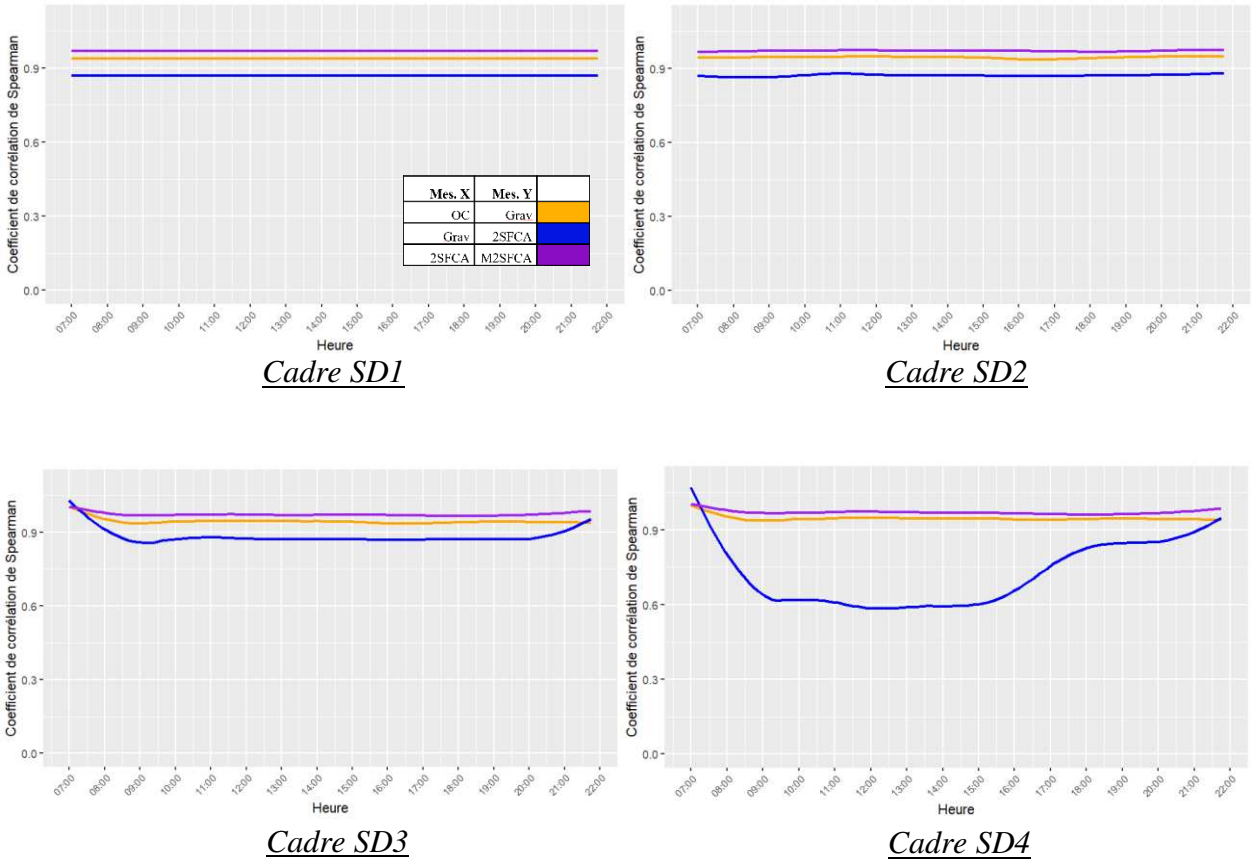
		SD4		
		Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD4	OC	0,95	0,65	0,62
	Gravitaire		0,72	0,74
	2SFCA			0,97

Les coefficients de corrélation de Spearman colorés en bleu sont les coefficients entre deux mesures différentes d'une variable. Dans tous les contextes statiques-dynamiques, les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire, et les mesures 2SFCA et M2SFCA sont très corrélées en termes de répartition de l'accessibilité sur la population. Le premier résultat est souvent souligné dans la littérature est le second est cohérent avec les formulations des mesures. Les mesures gravitaire et 2SFCA qui se différencient par l'ajout de la concurrence aux opportunités sont également très corrélées en moyenne dans les quatre contextes statiques-dynamiques, même si ces scores sont plus faibles que les autres. De plus, la corrélation chute à 0,72 dans le contexte complètement dynamique. La considération de la compétition dans la mesure 2SFCA favorise et défavorise certaines zones plus ou moins denses en population, qui donne des différences de répartition de l'accessibilité sur la population (plus faibles corrélations de Spearman). De plus, en complètement dynamique (lorsque les mouvements de population sont intégrés), les différences entre les zones plus et moins denses sont accentuées.

Ensuite, les coefficients de corrélation calculés dans un contexte dynamique avec deux mesures différentes d'une variable (moyennes en bleues dans les Tableau 4-4), sont présentés en détail au cours d'une journée sur les graphiques suivants. La légende est donnée dans le Tableau 4-5.

Tableau 4-5 : Légende pour les coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les mesures d'accessibilité

Mesure X	Mesure Y	Couleur
OC	Gravitaire	
Gravitaire	2SFCA	
2SFCA	M2SFCA	



Cadre SD1 *Cadre SD2*

Cadre SD3 *Cadre SD4*

Figure 4-3 : Coefficients de corrélation de Spearman temporels entre les mesures d'accessibilité

Ces résultats confirment les analyses présentées sur les moyennes et apportent quelques précisions. Premièrement, le coefficient de corrélation de Spearman entre la mesure gravitaire et la mesure 2SFCA est très élevé en début de journée lorsque les opportunités sont considérées dynamiques (SD3). En effet, lorsque peu d'opportunités sont disponibles, l'impact de la compétition est plus faible et les deux mesures sont plus corrélées. Deuxièmement, la corrélation entre la mesure gravitaire et la mesure 2SFCA chute à 0,6 en cours de journée dans le contexte dynamique SD4 et

est plus haute en début et fin de journée, ce qui confirme l'explication donnée précédemment. La supposée haute valeur obtenue entre ces deux mesures à 7 :00 est simplement un effet du lissage des courbes.

4.2.2 Coefficient de variation

Le coefficient de variation est calculé selon la formule suivante :

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (X_i - \langle X \rangle)^2}{n-1}}}{\langle X \rangle} \qquad (32)$$

Où C_v est le coefficient de variation et X un vecteur de dimension n.

Le coefficient de variation est calculé de deux manières : individuellement et temporellement. Le coefficient de variation individuel calcule les variations d'accessibilité entre les individus, à chaque heure. Lorsque les individus sont considérés statiques, cela revient à calculer un coefficient de variation spatiale pondéré par le nombre de personne. Le coefficient de variation temporel étudie les variations temporelles de l'accessibilité pour chaque individu. Dans le cas où les individus sont considérés dynamiques, les coefficients de variations sont uniquement calculés sur les individus qui passent la journée complète (de 7 :00 à 22 :00) sur le territoire d'étude. En effet, l'accessibilité hors du territoire d'étude n'est pas calculée, ce qui attribue des valeurs d'accessibilité nulles aux individus sortant de cette zone.

Le premier coefficient de variation présenté est le coefficient de variation individuel, c'est-à-dire la variation de l'accessibilité entre les différents individus. Ces coefficients de variation entre les individus sont moyennés sur la journée pour donner le Tableau 4-6. Les couleurs sont subjectives est n'indiquent pas quels sont les meilleurs coefficients à obtenir.

Tableau 4-6 : Coefficients de variation individuels moyens au cours d'une journée

	OC	Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD1	0,84	0,84	0,74	0,87
SD2	0,84	0,85	0,81	0,94
SD3	0,93	0,97	0,95	1,11
SD4	0,87	0,91	0,94	1,10

D'après le Tableau 4-6, le coefficient de variation entre les individus augmente en intégrant les composantes dynamiques, avec un pic atteint pour le contexte dynamique SD3. C'est-à-dire que plus l'accessibilité est mesurée dynamiquement, plus les différences d'accessibilité entre les individus sont estimées importantes. Les coefficients de variations estimés avec la population dynamique sont légèrement plus faibles que lorsque la population est considérée statique. C'est-à-dire que les différences d'accessibilité sont plus importantes au domicile que là où se trouvent réellement les individus pendant la journée. Cet effet est plus faible sur les mesures 2SFCA et M2SFCA où la concurrence est également impactée par ces mouvements de population.

La mesure M2SFCA est la mesure qui indique les plus grands coefficients de variation dans les quatre cadres statiques-dynamiques. La mesure 2SFCA indique des coefficients de variation plus faibles dans les deux contextes les plus statiques (avant intégration des dynamiques des opportunités), et pas d'autre tendance particulière n'est observée entre les mesures.

Finalement, l'évaluation des écarts d'accessibilité entre les individus est dépendante de la mesure et des considération dynamiques. Les figures suivantes présentent ces résultats en détail au cours d'une journée.

En effet, l'évolution de ce coefficient de variation au cours de la journée est présentée sur les Figure 4-4 et Figure 4-5. Premièrement, un graphique correspond au coefficient de variation obtenu à partir d'une mesure dans les différents contextes statiques-dynamiques. La légende est la suivante :

Tableau 4-7 : Légende pour les coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des cadres SD

	TC	Opportunités	Population	Couleur
SD1	**S**	**S**	**S**	
SD2	**D**	**S**	**S**	
SD3	**D**	**D**	**S**	
SD4	**D**	**D**	**D**	

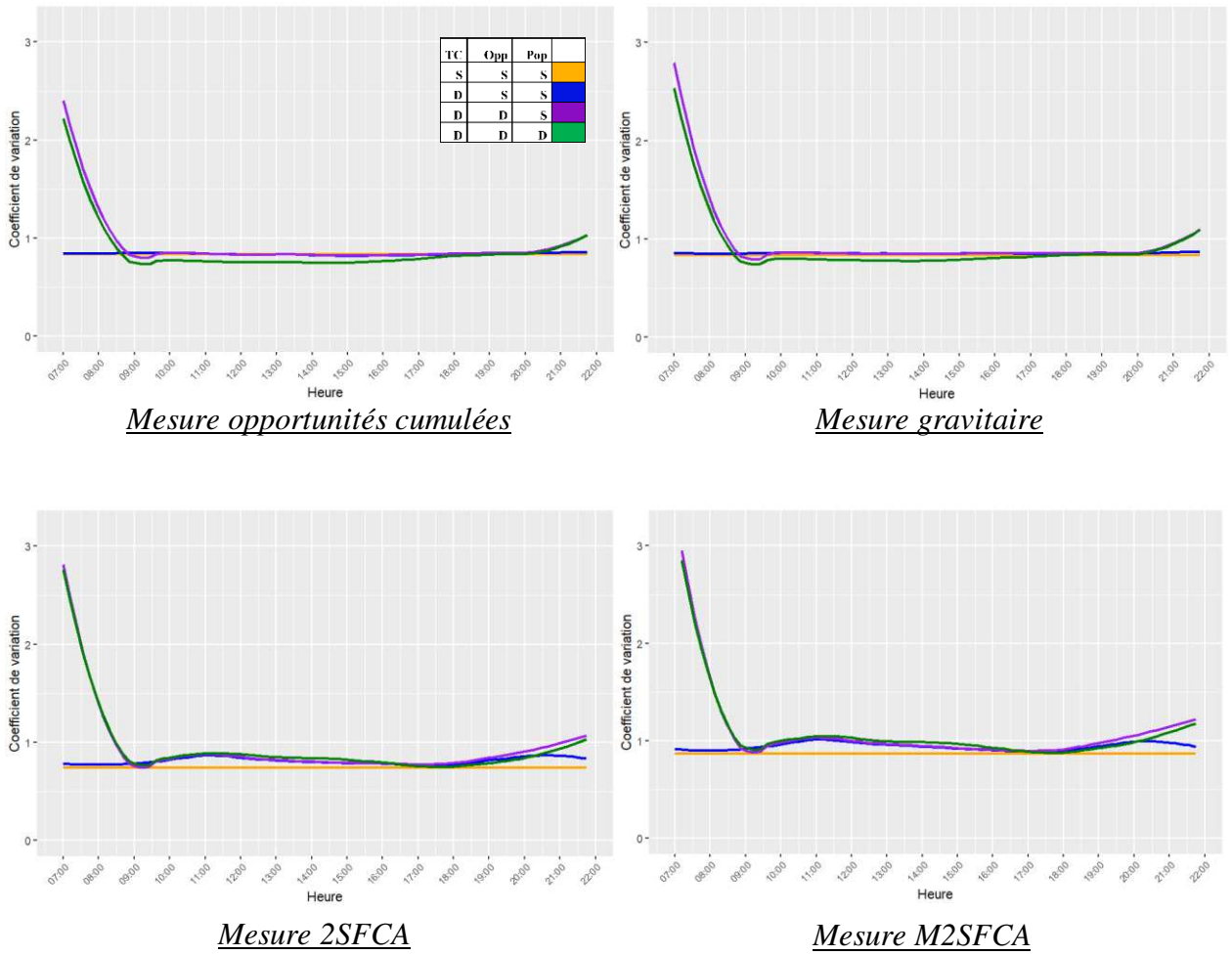


Figure 4-4 : Coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des cadres SD

La première tendance observée sur les moyennes est l'augmentation des coefficients de variation quand la dynamique des mesures augmente, avec un pic en SD3 (ajout des opportunités dynamiques). En réalité, pour les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire, les coefficients de variation sont similaires au cours de la journée dans les trois premiers contextes dynamiques (avant intégration des mouvements de population) et légèrement plus faibles quand on intègre cette dernière dynamique. Cependant, le coefficient de variation est élevé en début de journée quand les heures d'ouverture des commerces sont intégrées, et cela est logique car l'accessibilité est très faible pour une grande partie de la population. Cette tendance est également observée pour les deux mesures 2SFCA. Cependant et contrairement au deux autres mesures, l'intégration de la population dynamique a peu d'impact sur les mesures qui intègrent la compétition. De plus, ces deux mesures

sont sensibles à l'ajout des dynamiques des transports. En effet, le coefficient de variation est globalement plus élevé au cours de la journée lorsque ces dynamiques sont considérées. Cela semble logique, mais il est difficile d'expliquer pourquoi les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire n'y sont pas sensibles.

Deuxièmement, les graphiques sont triés par contexte statique-dynamique : un graphe correspond aux coefficients de variation mesurés avec différentes mesures dans un même contexte statique-dynamique. La légende est la suivante :

Tableau 4-8 : Légende pour les coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des mesures

Mesure	Couleur
OC	
Gravitaire	
2SFCA	
M2SFCA	

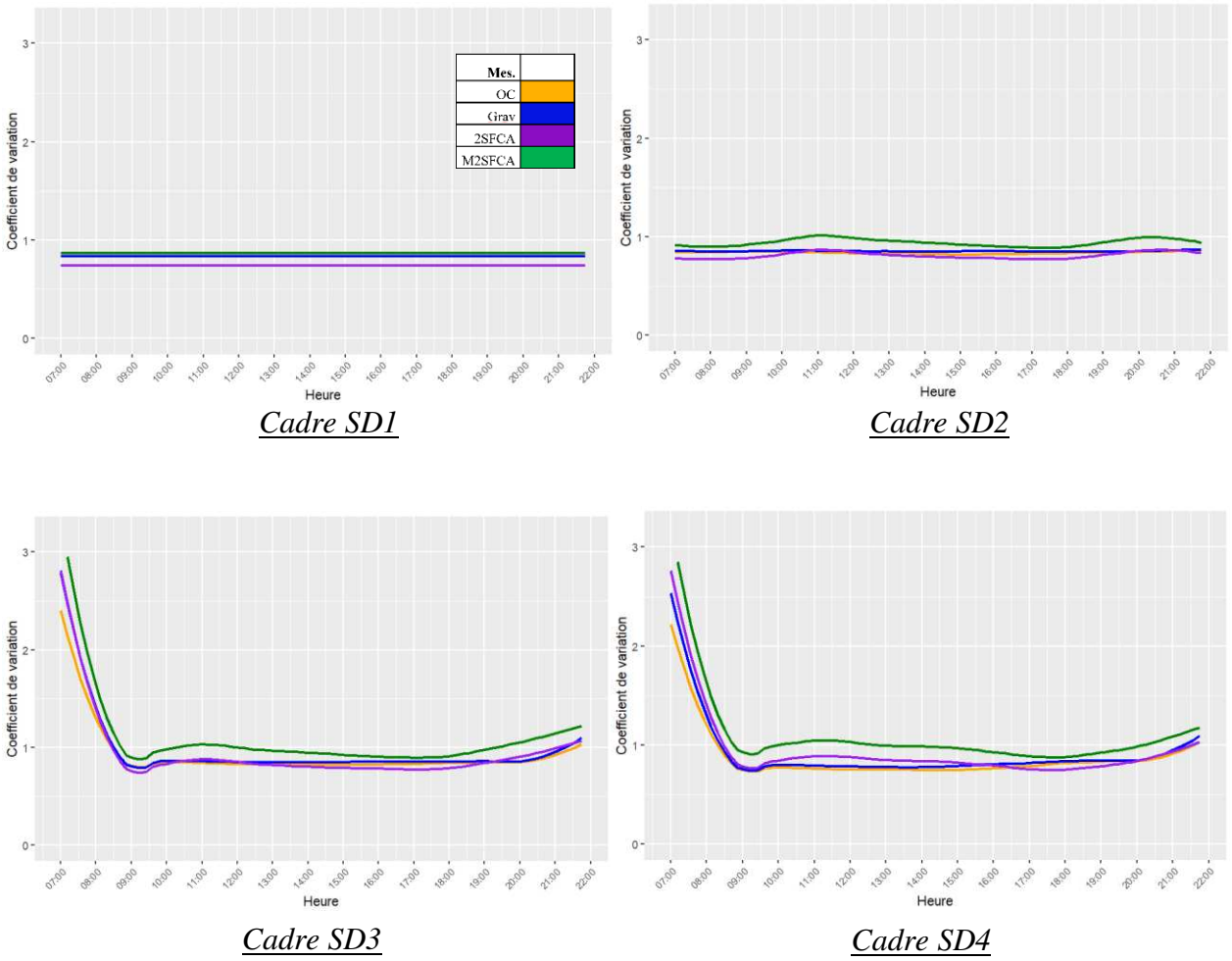


Figure 4-5 : Coefficients de variation individuels au cours d'une journée : Comparaison des mesures

La principale tendance observée sur les moyennes entre les différentes mesures est que la mesure M2SFCA donne des plus grands coefficients de variation. Cela est également observé au cours de la journée où la courbe correspondante est systématiquement au-dessus des autres, peu importe l'heure et le contexte statique-dynamique. Les courbes des trois autres mesures sont presque confondues tout au long de la journée, dans les quatre contextes dynamiques. De plus, les variations mentionnées à l'ajout du transport dynamique (SD2), pour la mesure 2SFCA, sont visibles ici mais n'impliquent pas de hausse du coefficient de variation par rapport aux autres mesures.

Finalement, les coefficients de variations d'accessibilité mesurés entre les individus varient considérablement selon le contexte statique-dynamique, selon la mesure et selon la période de la journée.

Pour terminer l'analyse, les coefficients de variation temporels sont calculés. Pour chaque individu, la variabilité de l'accessibilité au cours du temps est calculée. Étant donné le grand nombre d'individus considéré, les résultats présentés dans le Tableau 4-9 donnent les coefficients de variation temporels moyens, sur l'ensemble de la population.

Tableau 4-9 : Coefficients de variation temporels moyens sur les individus

	OC	Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
SD1	0,00	0,00	0,00	0,00
SD2	0,46	0,44	0,47	0,51
SD3	0,62	0,62	0,65	0,69
SD4	0,69	0,71	0,75	0,81

Le premier résultat que fournit le Tableau 4-9 est l'augmentation de la variabilité temporelle à l'intégration des dynamiques des composantes. Logiquement, dans le contexte complètement statique, la variabilité temporelle est nulle. Ensuite, la variabilité temporelle augmente considérablement à l'intégration des transports dynamiques puis à l'intégration des heures d'ouverture des commerces. En effet, les variations des services de transport collectif impliquent des variations temporelles de l'accessibilité et l'évolution de la disponibilité des opportunités également. Enfin, les mesures de variation temporelle de l'accessibilité des individus augmentent lorsque leurs mouvements sont considérés puisqu'ils visitent des zones à accessibilité variable.

Le deuxième résultat est l'augmentation de la variabilité temporelle quand la mesure s'enrichit. Cela est dû à l'augmentation des variables dans les mesures, pouvant être affectées par les variations des composantes dynamiques. Malgré cela, les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire présentent des résultats très proches.

En conclusion, la variabilité temporelle de l'accessibilité est (assez logiquement) dépendante du contexte statique-dynamique et de la mesure.

4.3 Analyse d'équité

Les deux parties précédentes se concentraient sur l'accessibilité directement mesurée. Cette partie est consacrée à deux analyses d'équité découlant des mesures d'accessibilité. Ainsi, l'objectif est de voir si les conclusions tirées d'analyses basées sur l'accessibilité diffèrent selon les mesures d'accessibilité et selon les considérations dynamiques des composantes urbaines.

Deux diagnostics d'équité sont présentés : un diagnostic d'équité horizontale et un diagnostic d'équité verticale. Ainsi, ces évaluations étudient l'équité entre les individus et non spatialement. L'équité spatiale n'est pas étudiée car elle ne permet pas d'intégrer correctement les déplacements des individus dans le dernier cadre statique-dynamique. Cependant, les analyses faites sans considérer les mouvements de population s'apparentent à des analyses spatiales, pondérées par le nombre d'individus présents dans chaque zone.

4.3.1 Équité horizontale

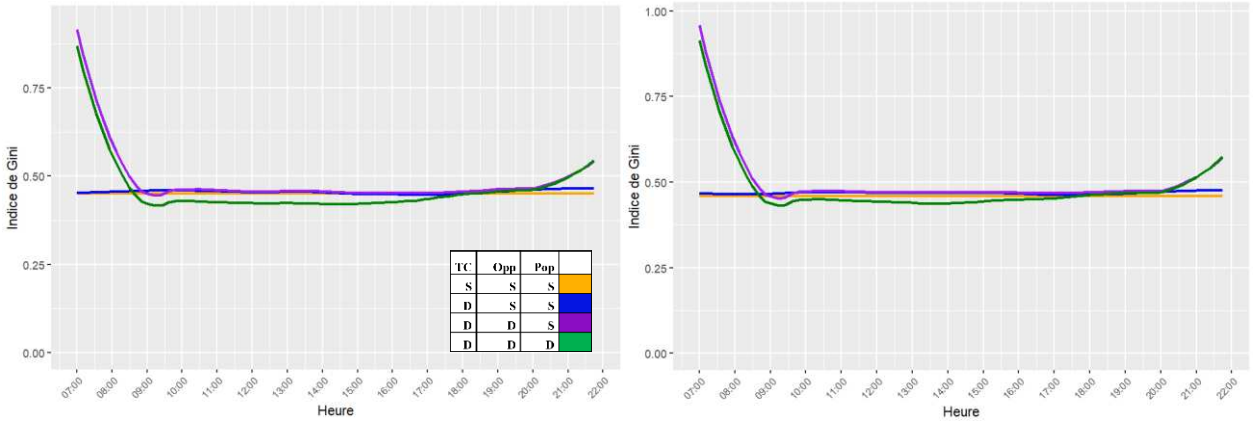
La première analyse est une analyse d'équité horizontale. Pour rappel, l'équité horizontale considère tous les individus, ou tous les individus d'un même groupe (capacité et besoins), comme égaux, justifiant un traitement égal. La métrique associée la plus populaire est la courbe de Lorenz à partir de laquelle il est possible de calculer l'indice de Gini. Pour cette analyse, l'indice de Gini est utilisé comme indicateur d'équité horizontale, sur l'ensemble des individus qui sont considérés comme égaux. L'indice de Gini est calculé toutes les 15 minutes au cours de la journée, à partir des quatre mesures dans les quatre contextes statiques-dynamiques. Un indice de Gini de 0 indique une égalité parfaite alors qu'un indice de Gini de 1 indique une inégalité parfaite (toutes les ressources détenues par une seule personne).

Les premiers résultats comparent les indices de Gini obtenus dans les quatre cadres statiques-dynamiques, pour chaque mesure d'accessibilité.

La légende est redonnée ci-dessous. La lettre « S » signifie que la composante est considérée statique alors que la lettre « D » signifie que la composante est intégrée dynamiquement à la mesure.

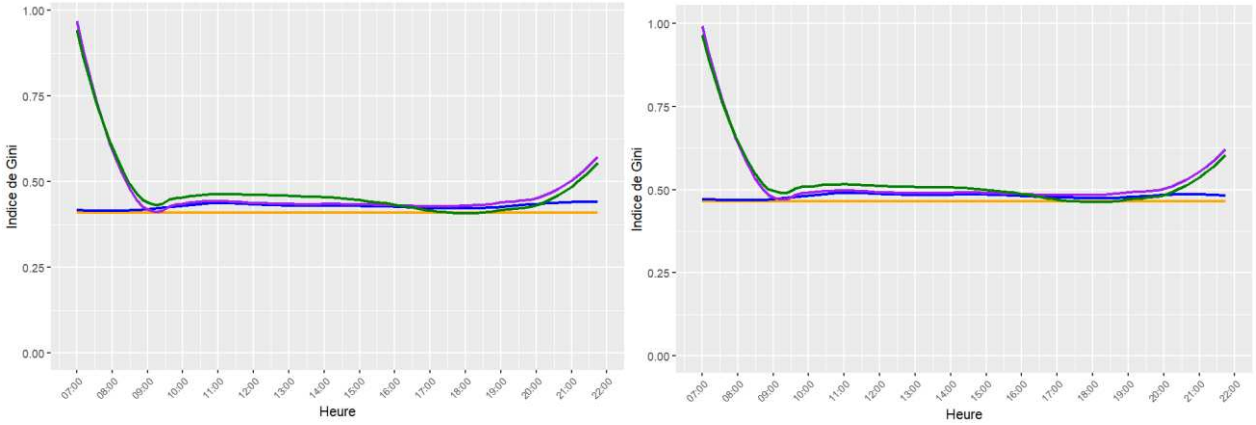
Tableau 4-10 : Légende pour les coefficients de Gini temporels : comparaison des cadres SD

	TC	Opportunités	Population	Couleur
S	**S**	**S**	**S**	
SD1	**D**	**S**	**S**	
SD2	**D**	**D**	**S**	
D	**D**	**D**	**D**	



Mesure opportunités cumulées

Mesure gravitaire



Mesure 2SFCA

Mesure M2SFCA

Figure 4-6 : Coefficients de Gini temporels : comparaison des cadres SD

L'indice de Gini est peu sensible à l'ajout des dynamiques des transports, peu importe la mesure d'accessibilité. En effet, il varie peu entre les cadres statiques-dynamiques 1 et 2 pour les mesures

d'opportunités cumulées et gravitaire, et est très légèrement plus élevé pour le cadre statique-dynamique 2 pour les mesures 2SFCA.

L'indice de Gini est cependant très sensible à l'ajout des dynamiques des opportunités (SD3). Il est très élevé et proche de 1 en début de journée et croît en fin de journée, pour les quatre mesures d'accessibilité. Ainsi, il indique de fortes inégalités à ces périodes-là. En effet lorsque peu de commerces sont ouverts, l'accessibilité totale disponible à la population est répartie sur le peu d'individus ayant accès à ces commerces, ce qui d'après l'indice de Gini correspond à une forte inégalité. Cet effet est moins prononcé en fin de journée car plus de commerces sont accessibles.

Pour les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire, l'indice de Gini indique une égalité légèrement meilleure lorsque les mouvements des individus sont pris en compte. En effet, les individus se déplacent en nombre vers les zones plus denses en activités qui sont des zones où l'accessibilité mesurée est généralement élevée. Ainsi, moins d'individus se trouvent dans des zones pauvres en accessibilité et plus d'individus se trouvent dans des zones d'accessibilité semblable. Cela résulte en un indice de Gini plus faible. L'effet inverse se produit pour les deux mesures 2SFCA, ce qui indique une répartition de l'accessibilité plus inégale entre 9 :00 et 17 :00 lorsque les déplacements des individus sont considérés. Cela est dû à l'intégration de la concurrence dans les mesures qui diagnostiquent une accessibilité plus faible dans les zones à forte concurrence et plus forte dans les zones à faible concurrence. Ainsi, une meilleure accessibilité peut être évaluée sur une plus faible part de la population, ce qui donne un plus grand indice de Gini. A partir de 17 :00, l'indice de Gini évalue une meilleure équité en SD4 que SD3, comme pour les deux premières mesures. L'effet de la concurrence diminue et s'étale sur le territoire lorsque les individus quittent les zones denses en activités.

Deuxièmement, les graphiques sont triés par contexte statique-dynamique : un graphe correspond aux indices de Gini mesurés avec différentes mesures dans un même contexte statique-dynamique. La légende est la suivante :

Tableau 4-11 : Légende pour les coefficients de Gini temporels : comparaison des mesures d'accessibilité

Mesure	Couleur
OC	
Gravitaire	
2SFCA	
M2SFCA	

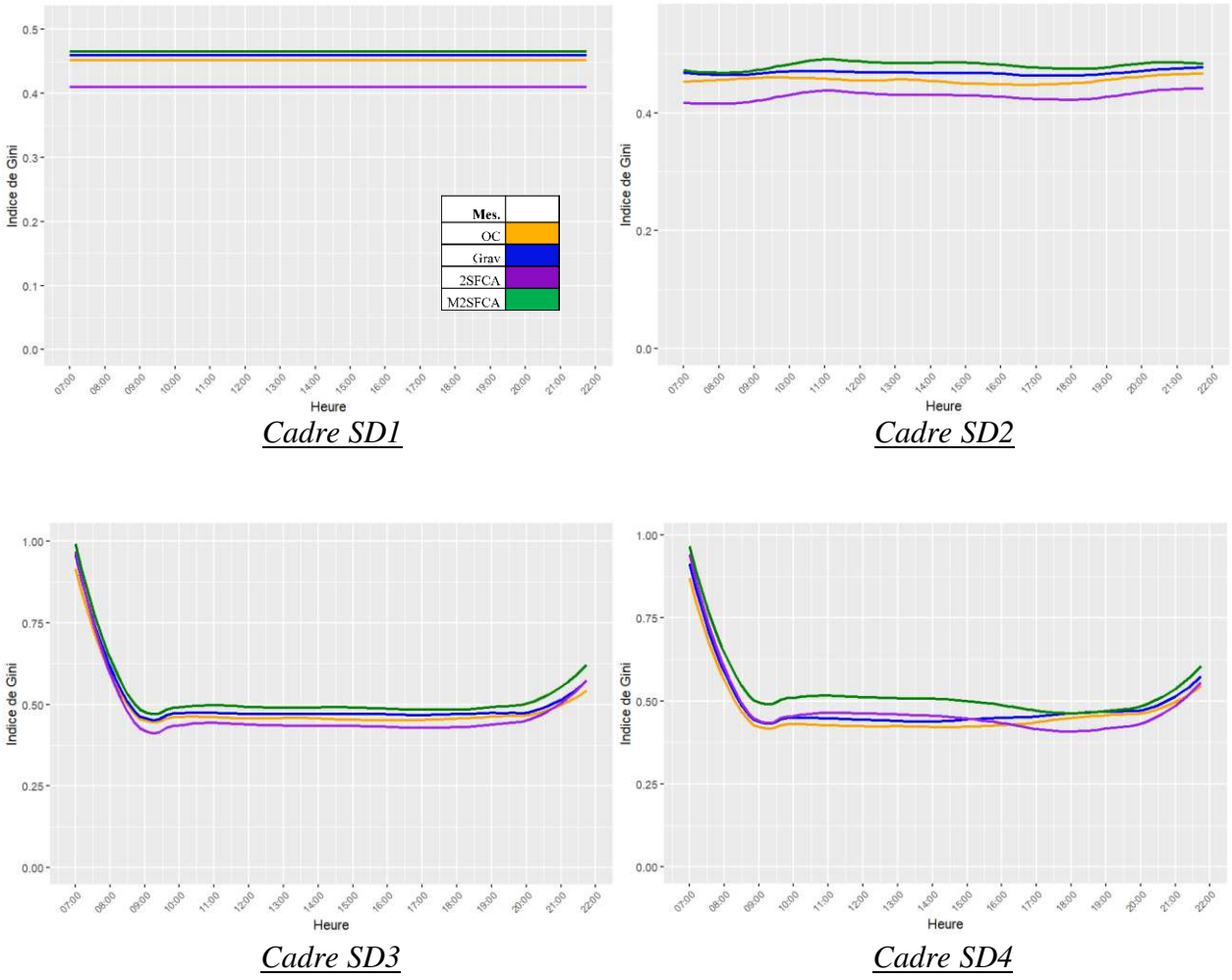


Figure 4-7 : Coefficients de Gini temporels : comparaison des mesures d'accessibilité

Dans les trois premiers cadres statiques-dynamiques, la mesure M2SFCA indique la répartition de l'accessibilité la plus équitable entre les individus au cours de la journée, suivie des mesures

gravitaire et d'opportunités cumulées. La mesure 2SFCA évaluent le plus faible indice de Gini, soit la répartition la moins équitable de l'accessibilité entre les individus. Le passage de la mesure d'opportunités cumulées à la mesure gravitaire avec l'intégration d'une fonction du temps de trajet accentue les écarts d'accessibilité entre les individus, ce qui donne un plus fort indice de Gini. L'intégration de la concurrence mitige cet effet car l'accessibilité est pondérée par le nombre de personnes qui se la partagent. Ainsi, l'accessibilité mesurée dans les zones à forte densité de population (qui présentent généralement des hautes valeurs d'accessibilité) évaluent désormais une plus faible accessibilité, et l'effet inverse se produit dans les zones à faible densité de population. L'accessibilité ainsi mesurée est mieux répartie sur les individus ce qui donne un plus faible indice de Gini. L'intégration d'une fonction des temps de trajets dans la mesure M2SFCA induit le même effet que présenté précédemment et résulte en l'indice de Gini le plus haut mesuré, soit la moins bonne évaluation d'équité.

Dans le dernier cadre statique-dynamique (complètement dynamique, après l'intégration des mouvements de la population), les effets du passage d'une mesure à une autre présentés juste avant reste valable, mais la mesure 2SFCA n'est plus celle qui indique la meilleure équité tout au long de la journée. En effet, entre 10 :00 et 15 :00, les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire évaluent une meilleure répartition de l'accessibilité sur le territoire que la mesure 2SFCA. L'intégration de la concurrence « lisse » la répartition de l'accessibilité lorsque la population est considérée à domicile, mais certaines zones deviennent « trop » privilégiées pour peu d'individus quand les déplacements sont considérés. Cet effet s'amoindrit après 16 :00, comme précédemment.

Finalement, les diagnostics d'équité horizontale varient considérablement d'un cadre statique-dynamique à un autre et entre les différentes mesures d'accessibilité. Ces variations interviennent également au cours de la journée selon les cadres statiques-dynamiques. Ainsi le choix de la mesure et des dynamiques intégrées doit être cohérent avec l'étude mise en place pour ne pas aboutir à des erreurs d'interprétation sur l'évaluation de l'équité.

4.3.2 Équité verticale

Le deuxième diagnostic est un diagnostic d'équité verticale. Pour rappel, un diagnostic vertical de l'équité se penche sur les répartitions des ressources sur les individus, selon leur vulnérabilité. Il considère que les individus ne sont pas égaux, et que les populations les plus désavantagées ont des besoins supérieurs aux autres. La métrique utilisée ici est le coefficient de corrélation de

Spearman calculé entre les rangs d'accessibilité et les rangs de vulnérabilité. Plus le score est proche de 1, plus les personnes vulnérables sont favorisées : ce qui relève d'un bon score d'équité verticale. Et inversement, plus le score est proche de -1, plus les personnes vulnérables sont défavorisées au profit des personnes les moins vulnérables. La méthodologie de définition des rangs d'accessibilité et des rangs de vulnérabilité est présentée au chapitre 3. Selon cette méthodologie, les rangs d'accessibilité sont calculés par quatre méthodes distinctes : une méthode basée sur la médiane et trois méthodes reflétant trois approches suffisantistes.

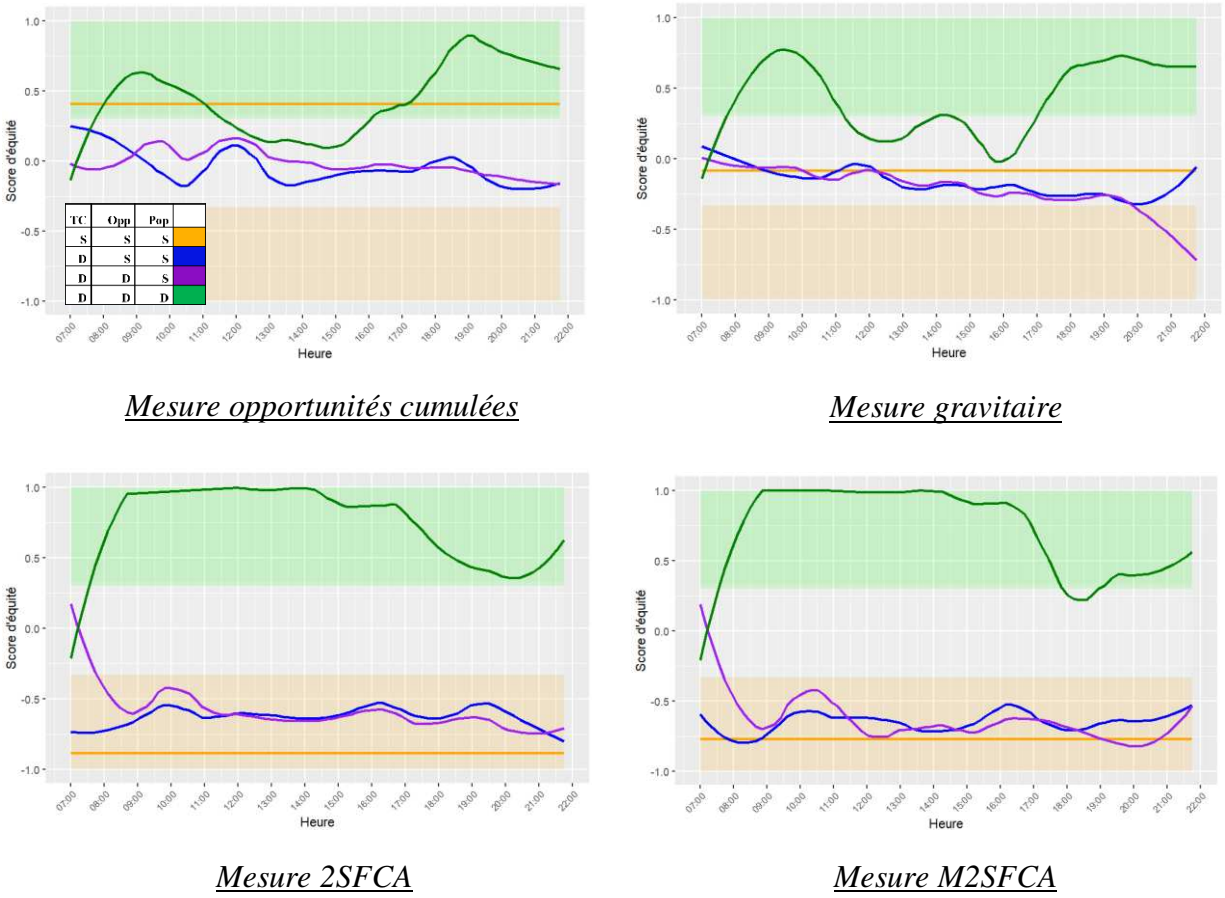
4.3.2.1 Approche médiane

Dans un premier temps, les rangs d'accessibilité sont générés selon les médianes d'accessibilité de chaque groupe de vulnérabilité, à chaque instant. Pour que les résultats soient plus lisibles, l'intervalle [1, -1] est divisé en trois de sorte à repérer les bons scores d'équité des mauvais, et de ceux proches de 0 n'indiquant pas de tendance particulière.

Pour rappel, la légende est la suivante, pour les quatre graphiques :

Tableau 4-12 : Légende pour les diagnostics d'équité verticale : Approche médiane

	TC	Opportunités	Population	Couleur
SD1	**S**	**S**	**S**	
SD2	**D**	**S**	**S**	
SD3	**D**	**D**	**S**	
SD4	**D**	**D**	**D**	



Mesure opportunités cumulées

Mesure gravitaire

Mesure 2SFCA

Mesure M2SFCA

Figure 4-8 : Diagnostic d'équité verticale temporel : Approche médiane

Le score d'équité mesuré en statique avec la mesure d'opportunités cumulées est de 0.41, ce qui est assez bon. Cependant, à l'ajout du transport et des opportunités dynamiques, ce score diminue considérablement et varie autour de 0 au cours de la journée. L'intégration des mouvements de la population augmente fortement le score d'équité qui atteint des pics à 9 :00 et 19 :00. L'équité diagnostiquée avec la mesure gravitaire présente les mêmes tendances, à la différence que le score évalué en statique est bien plus faible et proche de 0.

Les scores d'équité évalués avec les deux dernières mesures sont les plus impactés par l'intégration des dynamiques des composantes urbaines. En effet, ces scores sont très faibles lorsque les mouvements de population sont ignorés alors qu'ils sont très élevés lorsqu'ils sont considérés. Les diagnostics sont complètement opposés : les premiers considèrent que les personnes les moins vulnérables ont le meilleur accès aux ressources tandis que le dernier score indique le contraire.

Enfin, on remarque que les scores d'équité peuvent présenter des tendances en début et fin de journée, notamment à l'ajout des heures d'ouvertures des commerces. Ces tendances varient selon les mesures et les considérations dynamiques.

La conclusion est que le diagnostic d'équité effectué est fortement dépendant de la mesure, des considérations dynamiques et de la période de la journée, lorsque les rangs d'accessibilité sont basés sur la médiane.

4.3.2.2 Approche suffisantiste

Dans un second temps, les rangs d'accessibilité sont calculés en intégrant le concept suffisantiste. Le groupe de vulnérabilité qui a le meilleur rang d'accessibilité est celui qui a une plus grande part de sa population au-dessus du seuil de suffisance. En effet, cela signifie qu'une part plus faible des individus sont dans une situation d'accessibilité critique et que la répartition de l'accessibilité est telle qu'un maximum de personnes de ce groupe peut subvenir à ses besoins.

Pour rappel, trois approches suffisantistes sont présentées. La première considère que les individus doivent avoir accès à un minimum de ressources à chaque instant de la journée. La deuxième approche considère que les individus doivent avoir accès à ce minimum sur une partie définie de la journée et la dernière approche considère que l'accessibilité se cumule et que ce total doit être au-dessus d'une valeur seuil à la fin de la journée.

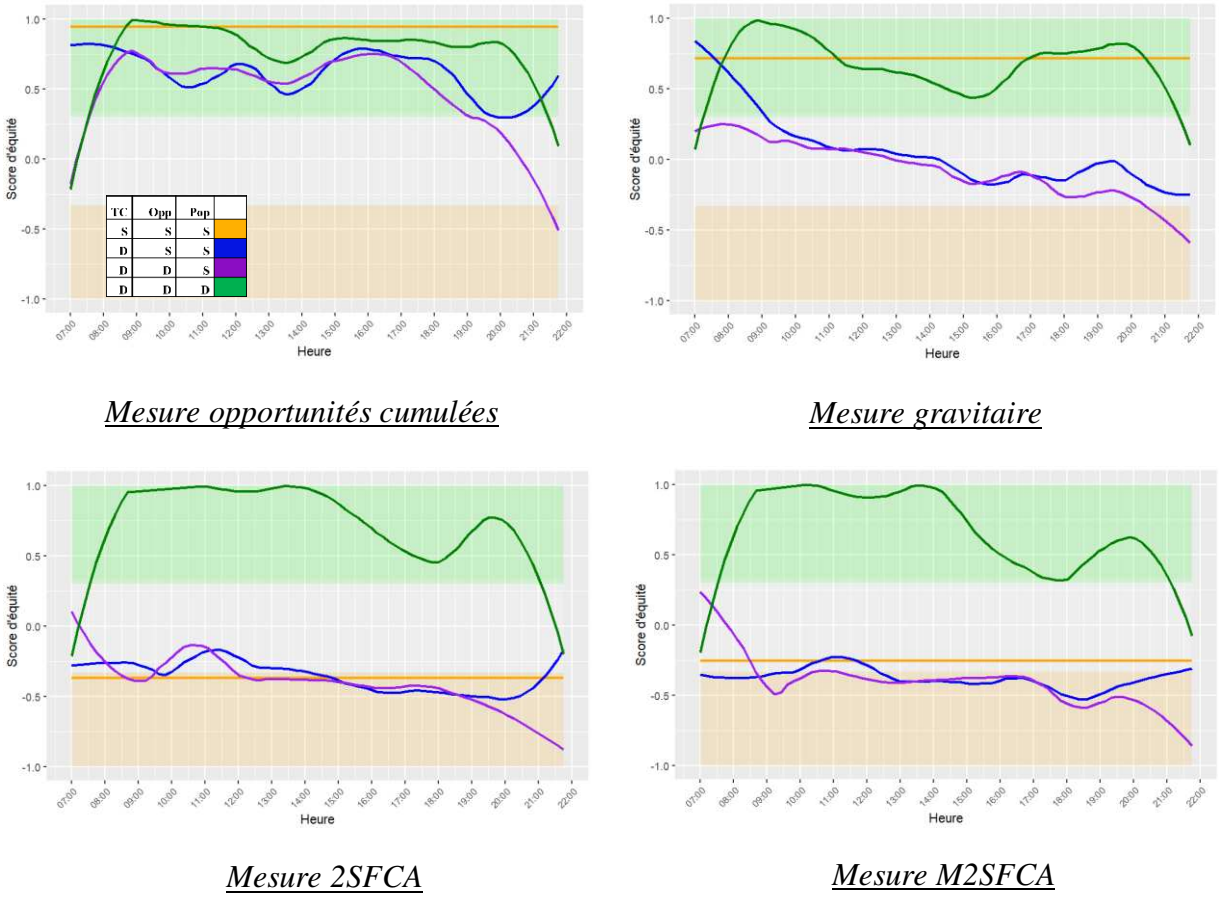
Méthode 1

Premièrement, les rangs d'accessibilité sont calculés à chaque instant selon le pourcentage de la population de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès à un seuil minimal d'accessibilité.

La légende est la suivante, pour les quatre graphiques :

Tableau 4-13 : Légende pour les diagnostics d'équité verticale : Première approche suffisantiste

	TC	Opportunités	Population	Couleur
SD1	**S**	**S**	**S**	
SD2	**D**	**S**	**S**	
SD3	**D**	**D**	**S**	
SD4	**D**	**D**	**D**	



Mesure opportunités cumulées

Mesure gravitaire

Mesure 2SFCA

Mesure M2SFCA

Figure 4-9 : Diagnostic d'équité verticale temporel : Première approche suffisantiste

Avec cette méthode, les scores d'équité évalués en utilisant la mesure d'opportunités cumulées sont très bons au cours de la journée, exceptés en début et fin de journée. Cependant et malgré les bons scores, il existe une forte différence de diagnostic (baisse générale du score) à l'ajout des dynamiques du transport et des opportunités (hausse du score) puis à l'ajout des mouvements de population.

De la même manière, les scores d'équité évalués avec la mesure gravitaire sont les meilleurs lorsque les composantes urbaines sont considérées comme étant complètement statiques ou complètement dynamiques. En revanche, à l'ajout des dynamiques du transport et des opportunités (dans les contextes dynamiques SD1 et SD2), le score d'équité décroit tout au long de la journée. Le diagnostic d'équité dépend fortement des considérations dynamiques et de la période de la journée.

Pour les deux mesures par captage en deux étapes, les résultats sont les mêmes que ceux obtenus avec la première méthode de calcul de score d'équité (basée sur la médiane) : lorsque les mouvements de populations sont ignorés, le score indique une légère tendance à la favorisation des personnes les moins vulnérables alors que l'inclusion de cette dynamique résulte en un bon score d'équité (les personnes vulnérables ont un meilleur accès aux ressources).

Encore une fois, il existe des tendances en début et fin de journée, dépendamment de la mesure et du contexte dynamique considéré.

Avec cette méthode également, la conclusion est que le diagnostic d'équité effectué est fortement dépendant de la mesure, des considérations dynamiques et de la période de la journée.

Méthode 2 et 3

Ensuite la seconde approche suffisantiste proposée suggère que chacun doive avoir accès à un minimum de ressources sur une période de la journée. Les rangs d'accessibilité sont calculés selon les parts de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès à ce minimal de 16 :00 à 20 :00.

Enfin la troisième approche suffisantiste considère que l'accessibilité se cumule au cours de la journée et que cette somme d'accessibilité cumulée doit être supérieure à un certain seuil pour chacun (l'accessibilité moyenne sur la journée d'un individu doit être supérieure à un seuil minimal). Les rangs d'accessibilité sont calculés selon les parts de chaque groupe de vulnérabilité ayant une accessibilité cumulée supérieure à ce seuil.

Les résultats des scores d'équité sont présentés dans les Tableau 4-14, Tableau 4-15 et Tableau 4-16. Une version améliorée de la troisième approche est également proposée : une personne peut cumuler à un instant une valeur maximum de ressources, le reste n'est pas comptabilisé dans la somme totale.

Tableau 4-14 : Diagnostic d'équité verticale : Deuxième approche suffisantiste

	OC	Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
S	0,94	0,71	-0,37	-0,26
SD1	-0,09	-0,37	-0,37	-0,37
SD2	-0,14	-0,37	-0,37	-0,43
D	0,77	0,43	0,83	0,49

Tableau 4-15 : Diagnostic d'équité verticale : Troisième approche suffisantiste

	OC	Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
S	0,94	0,71	-0,37	-0,26
SD1	0,77	0,31	-0,37	-0,37
SD2	0,31	0,20	-0,37	-0,37
D	0,77	0,77	0,83	0,94

Tableau 4-16 : Diagnostic d'équité verticale : Troisième approche suffisantiste avec seuil maximal

	OC	Gravitaire	2SFCA	M2SFCA
S	-0,66	-0,43	-0,66	-0,66
SD1	-0,66	-0,66	-0,66	-0,83
SD2	-0,66	-0,66	-0,83	-0,83
D	-0,43	-0,09	0,71	0,54

Les résultats obtenus avec la seconde et la troisième approche présentent les mêmes caractéristiques que les diagnostics d'équité effectués avec les méthodes précédentes. Avec la mesure d'opportunités cumulées et la mesure gravitaire, les meilleurs scores d'équité sont obtenus en complètement statique ou en complètement dynamique. Les scores obtenus avec les deux autres mesures sont négatifs, exceptés en complètement dynamique où ils avoisinent les 1. Les différences entre ces deux approches résident dans les scores évalués dans les contextes dynamiques SD1 et SD2, avec les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire : la première donne des résultats négatifs allant de -0.09 à -0.37 (donc une distribution légèrement en défaveur des personnes vulnérables) alors que l'autre donne des résultats positifs allant de 0.20 à 0.77 (soit une distribution de l'accessibilité favorisant les personnes vulnérables).

Enfin, lorsqu'un seuil max est considéré pour la troisième approche, tous les scores d'équité chutent fortement (à l'exception des scores basés sur les deux dernières mesures, en complètement dynamique). Une hypothèse pour expliquer ces différences est que les personnes les plus vulnérables ont un meilleur accès en journée qu'en fin de journée mais qu'en imposant un seuil maximal, le gain d'accessibilité en journée ne compense pas la pauvreté d'accès en fin de journée (voir les mesures d'accessibilité totale et les scores d'équité dynamiques en fin de journée).

CHAPITRE 5 CONCLUSION

L'accessibilité est définie comme la facilité d'accès à des activités par un moyen de transport à une heure donnée. Ainsi, comme le mentionnent Geurs et Van Wee (2004), l'accessibilité est l'interaction de quatre composantes : l'utilisation du sol, le système de transport, les individus et le temps. Actuellement le temps est inégalement intégré aux différentes études d'accessibilité, notamment en transport en commun. L'impact d'intégrer ou de négliger dans les mesures les dynamiques des différentes composantes de l'accessibilité est peu connu, surtout sur les études d'équité qui se basent sur des mesures d'accessibilité. En effet, l'accessibilité s'est imposée comme un indicateur pertinent pour étudier l'équité et le transport.

Pour tenter de répondre à ces différents enjeux, différents objectifs ont été définis :

- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur différentes mesures d'accessibilité
- Étudier l'impact de l'intégration de chaque dynamique urbaine sur des diagnostics d'équité
- Proposer une méthode d'évaluation de l'équité verticale qui intègre dynamiquement le concept suffisantiste

Pour répondre à ces objectifs, quatre mesures d'accessibilité ont été étudiées dans quatre cadres statiques-dynamiques, dans le contexte d'étude de l'accessibilité aux commerces alimentaires sur l'île de Montréal en transport collectif, au cours d'une journée de semaine. Les quatre mesures d'accessibilité étudiées sont basées sur la localisation : mesure d'opportunités cumulées, mesure gravitaire, mesure 2SFCA et mesure modifiée 2SFCA. Les quatre cadres d'étude statiques-dynamiques vont du plus statique au plus dynamique, par l'intégration progressive des variations temporelles du transport, des opportunités et des individus. Un diagnostic d'équité horizontale et verticale a été mené à partir de l'indice de Gini et du coefficient de corrélation de Spearman, basé sur quatre méthodes d'évaluation. Les principales contributions de cette recherche sont présentées dans la partie suivante, ainsi que les limites de la méthodologie et les différentes perspectives de recherche.

Finalement, l'intégration des différents paramètres dynamiques a de nombreuses répercussions sur les évaluations de l'accessibilité et sur les différents diagnostics d'équité basés sur l'accessibilité. Le fait le plus marquant est l'impact de la prise en compte des déplacements des individus dans les mesures. Lorsqu'ils sont intégrés, la distribution de l'accessibilité sur la population est grandement

modifiée. Les mesures d'opportunités cumulées et gravitaire identifient une meilleure accessibilité de la population, qui se déplace vers des zones plus denses. Pour les mesures 2SFCA, cet effet est mitigé par la concurrence (mais la distribution de l'accessibilité est tout de même impactée). Les mesures intégrant les variations de services de transport collectif sont très proches des mesures statiques, et l'ajout des heures d'ouvertures des commerces impacte les mesures proportionnellement aux surfaces disponibles : donc beaucoup en début et fin de journée, quand les commerces sont fermés. Enfin les mesures d'équité (verticales notamment) sont très sensibles à l'intégration des composantes urbaines dynamiques aux évaluations. Les résultats des diagnostics peuvent être diamétralement opposés selon la mesure et le contexte statique-dynamique considérés. Par exemple, les mesures 2SFCA évaluent une répartition de l'accessibilité très en défaveur des personnes vulnérables lorsque les mouvements de population ne sont pas considérés, mais très en leur faveur quand ils le sont. Les résultats sont plus variables pour les autres mesures mais suivent la même tendance.

Les évaluations d'accessibilité et d'équité sont très dépendantes des choix de paramètres dynamiques et de la mesure d'accessibilité utilisée. Ainsi, les acteurs basant leurs travaux sur de telles mesures doivent tenir compte de ces enjeux : la meilleure mesure d'accessibilité n'est pas la plus complexe ou la plus dynamique, c'est la mesure la plus adaptée au contexte de l'étude.

La première contribution de ce mémoire est l'étude de l'intégration des dynamiques des trois composantes urbaines de l'accessibilité sur quatre mesures d'accessibilité. En effet, les dynamiques du transport, des opportunités et de la population ont été intégrées progressivement à la mesure d'opportunités cumulées, à la mesure gravitaire, à la mesure 2SFCA et à la mesure M2SFCA. Pour intégrer les dynamiques de la population à des mesures basées sur la localisation, cette recherche propose d'étendre la méthode de Jarv et al. (2018) à quatre nouvelles mesures. Pour chaque mesure l'accessibilité a été évaluée dans les quatre cadres d'étude statiques-dynamiques, et la comparaison des résultats a permis de comprendre l'impact de l'intégration des dynamiques urbaines sur les mesures d'accessibilité. Ce sont notamment l'accessibilité totale mesurée, les coefficients de corrélation de Spearman individuels et temporels entre les mesures, et les coefficients de variation individuels et temporels de chaque mesure qui ont été comparés.

La deuxième contribution de ce mémoire est la comparaison des différentes mesures d'accessibilité dans les différents cadres statiques-dynamiques. En effet, la première contribution est l'étude de

l'impact de l'intégration des dynamiques urbaines sur les différentes mesures d'accessibilité, mais l'étude des différences entre mesures dans chaque cadre statique-dynamique a également été menée. La comparaison des résultats a été faite avec les indicateurs cités pour la première contribution.

La troisième contribution de cette recherche est le développement de méthodes dynamiques d'évaluation de l'équité verticale, intégrant le concept suffisantiste. En effet, ce concept suggère que tous les individus bénéficient d'un minimum de ressources pour pouvoir subvenir à leurs besoins. Dans un contexte dynamique, la question se pose de la définition de l'atteinte de ce minimum. La méthode proposée se base sur le coefficient de corrélation de Spearman entre des rangs d'accessibilité et des rangs de vulnérabilité. Les rangs d'accessibilité sont définis selon les pourcentages de chaque groupe de vulnérabilité ayant accès au minimum de ressource défini. Ainsi, cette méthode suggère qu'une population est avantagée en termes d'accessibilité si une plus grande part de ses individus peut subvenir à ses besoins. La première méthode regarde les pourcentages de chaque groupe au-dessus du seuil, à chaque instant de la journée. La deuxième méthode calcule les pourcentages de chaque groupe au-dessus du seuil sur l'entièreté d'une période critique de la journée. Et la dernière méthode s'intéresse aux pourcentages des individus en moyenne au-dessus du seuil sur une journée. La dernière méthode a été évoluée pour que les moyennes ne soient pas trop impactées par des quantités d'accessibilité trop élevées au cours de la journée, dont les individus ne bénéficient pas réellement.

La dernière contribution de ce mémoire est la comparaison des différents diagnostics d'équité obtenus avec les quatre mesures d'accessibilité dans les quatre contextes statiques-dynamiques. En effet, à partir de toutes ces évaluations de l'accessibilité, des diagnostics d'équité ont été effectués : un diagnostic d'équité horizontale avec l'indice de Gini et quatre diagnostics d'équité verticale avec le coefficient de corrélation de Spearman, basés sur les trois méthodes données précédemment et sur une méthode médiane. Finalement, ces comparaisons ont été effectuées dans le sens des deux premières contributions : c'est-à-dire que les résultats obtenus avec une même mesure d'accessibilité dans les différents cadres statiques-dynamiques ont été comparés, ainsi que les résultats obtenus dans un même cadre statique-dynamique avec les différentes mesures d'accessibilité.

5.1 Limites

La méthodologie présente différentes limites, de différentes natures. La première limite est relative aux données et à leur manipulation, qui ne permettent pas de brosser un portrait réel de la ville étudiée sur la période souhaitée : l'étude présentée et ses résultats sont partiellement représentatifs. Cela ne pose pas réellement de problème puisque ce n'est pas directement le diagnostic de l'accessibilité sur l'île de Montréal qui nous intéresse, mais l'impact des dynamiques urbaines sur une étude d'accessibilité quelconque. Cependant, alors que cette étude prône de porter une attention particulière sur ces dynamiques, elle montre qu'elles sont difficiles à intégrer et que le planificateur est dépendant des données pour considérer ces dynamiques. De plus, l'impact de cet écart à la réalité sur les résultats de l'étude n'est pas connu. Les premières données impliquées ici sont les données GTFS, les données OpenStreetMap et l'enquête OD qui ne présentent pas la même temporalité. Les données GTFS représentent le mois de novembre 2023, la temporalité des données OpenStreetMap n'est pas connue et la consolidation a été faite avec des données Google Maps de janvier 2024, les données OD datent de 2018. Ensuite, le nombre de points d'origine des mesures et le nombre d'opportunités a régulièrement été réduit pour limiter les temps de calcul de temps de trajet. Et enfin la qualité générale des différentes données peut être remise en question, notamment celle des données OpenStreetMap utilisées pour représenter les commerces alimentaires, cela concerne : le placement des points, les types de commerces et les superficies utilisées.

La deuxième limite identifiée de la méthodologie est relative aux mesures d'accessibilité. Premièrement, les origines des mesures ont été définies de façon aléatoire selon la liste des unités d'évaluation foncière de type logement. Cette méthode est cohérente avec la distribution de la population de nuit mais pas nécessairement avec la distribution de la population de jour : il y a donc plus de points d'origine dans les zones denses en logements qui ne sont pas nécessairement des zones d'activités la journée, et inversement. Ainsi, la résolution spatiale de certaines zones peut ne pas saisir précisément les mouvements de la population dynamique. Deuxièmement, les résultats sont dépendants de la fonction de friction implémentée dans les mesures d'accessibilité. Même si la fonction choisie découle d'une analyse comparative de différentes fonctions, la méthode proposée a directement exclu la possibilité de baser cette fonction sur une analyse comportementale des déplacements. Cela est le cas de la majorité des études d'accessibilité et l'impact sur les résultats de cette recherche n'est pas connu.

La dernière limite identifiée de la méthodologie est relative aux diagnostics d'équité. Tout d'abord, le concept suffisantiste nécessite la définition d'un seuil d'accessibilité. Pour cette recherche, les seuils utilisés ne représentent pas de réalité physique et ont été définis de manière arbitraire. Cependant, il est difficile de définir ces seuils d'une façon non arbitraire lorsque les mesures d'accessibilité sont peu interprétables (mesure gravitaire, mesure 2SFCA et mesure M2SFCA). Enfin, la méthode proposée ne met jamais en relation les scores d'accessibilité et les scores d'équité, alors que les deux sont liés. En effet, que vaut un bon score d'équité si tous les individus ne disposent pas d'un niveau d'accessibilité convenable ?

5.2 Perspectives de recherche

Ce mémoire présente différentes perspectives de recherche pertinentes. Les premières perspectives sont celles qui répondent à certaines des différentes limites identifiées. En effet, certaines pistes peuvent être explorées concernant les données dynamiques. Par exemple, le suivi des personnes au cours de la journée peut être fait à l'aide de données qui sont plus facilement actualisables pour une période choisie, comme le font Jarv et al. (2018). Un Google API (certes payant) peut également être utilisé pour extraire des données à jour sur les commerces. Concernant la limite identifiée sur la sélection aléatoire des points d'origines des mesures d'accessibilité, cela peut être corrigé en sélectionnant les points avec une méthode aléatoire stratifiée parmi l'enquête OD, pour identifier les lieux d'habitations et les lieux d'activités. Enfin, les études d'équité peuvent être mises en parallèle des évaluations de l'accessibilité pour répondre aux enjeux identifiés. Par exemple, Cheng et al. (2019) présentent un graphique avec l'accessibilité en abscisse et l'équité verticale en ordonnée. Avec ce type de graphique, il faudrait réfléchir à la représentation temporelle des résultats.

D'autres perspectives de recherche sont envisagées pour étendre l'analyse. Premièrement les résultats pourraient être reproduits sur d'autres mesures d'accessibilité, comme les mesures duales présentées en revue de littérature, ou encore sur d'autres évolutions des mesures 2SFCA. Ensuite l'étude pourrait être reproduite sur d'autres villes ou sur d'autres types d'opportunités aux dynamiques différentes pour valider les résultats ou identifier d'autres tendances de l'impact des dynamiques urbaines sur les mesures d'accessibilité. Enfin, les résultats présentés peuvent être reproduits pour un autre jour de semaine ou de week-end pour comparer les résultats. L'échelle temporelle peut également être modifiée pour par exemple étudier les variations temporelles sur la

semaine. Cela impliquerait de redéfinir les dynamiques des transports, des opportunités et de la population (qui dans ce cas ne semblent pas adaptées à une étude sur une semaine).

Enfin une dernière perspective de recherche est l'inclusion d'analyses spatiales à la méthode : il serait intéressant d'effectuer des comparaisons entre différentes zones de l'île de Montréal. Les résultats présentés précédemment sont-ils plus importants dans les zones denses ? Dans les zones moins denses ? La planification basée sur l'accessibilité étant fortement dépendante de la composante spatiale, cet axe de recherche pourrait être approfondi.

RÉFÉRENCES

Apparicio, P., Cloutier, M.-S., & Shearmur, R. (2007). The case of Montréal's missing food deserts: Evaluation of accessibility to food supermarkets. International Journal of Health Geographics, 6(1), 4. https://doi.org/10.1186/1476-072X-6-4

Apparicio, P., Gelb, J., Dubé, A.-S., Kingham, S., Gauvin, L., & Robitaille, É. (2017). The approaches to measuring the potential spatial access to urban health services revisited: distance types and aggregation-error issues. International Journal of Health Geographics, 16(1), 32. https://doi.org/10.1186/s12942-017-0105-9

Ashik, F. R., Islam, M. S., Alam, M. S., Tabassum, N. J., & Manaugh, K. (2024). Dynamic equity in urban amenities distribution: An accessibility-driven assessment. Applied Geography, 164, 103199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2024.103199

Ashik, F. R., Mim, S. A., & Neema, M. N. (2020). Towards vertical spatial equity of urban facilities: An integration of spatial and aspatial accessibility. Journal of Urban Management, 9(1), 77-92. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.11.004

Béland, D. (2007). The Social Exclusion Discourse: Ideas and Policy Change. Policy & Politics, 35, 123-139. https://doi.org/10.1332/030557307779657757

Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1979). Disaggregate travel and mobility-choice models and measures of accessibility. In Behavioural travel modelling (pp. 654-679).

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/https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2005.01.006

Bhat, C., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H., Chen, Q., & Weston, L. (2000). Urban accessibility index: literature review.

Boisjoly, G., & El-Geneidy, A. (2016). Daily fluctuations in transit and job availability: A comparative assessment of time-sensitive accessibility measures. Journal of Transport Geography, 52, 73-81. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004

Bureau of Transportation Statistics (BTS), U.S. Department of Transportation. 1997. Transportation Statistics Annual Report 1997. BTS97-S-01. Washington, DC. https://doi.org/10.21949/1501084

Casetti, E. (1972). Generating Models by the Expansion Method: Applications to Geographical Research. Geographical Analysis, 4(1), 81-91. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1972.tb00458.x

Caulfield, B., Rock, S., & Ahern, A. (2014). Equity and Fairness in Transport Planning: The State of Play.

Cerdà, A., & El-Geneidy, A. (2010). Mesures de performance pour la planification de l'utilisation du sol et du transport dans la région métropolitaine de Montréal (p. 218). Ministère des Transports du Québec.

Cervero, R., Rood, T., & Appleyard, B. (1995). Job Accessibility as a Performance Indicator: An Analysis of Trends and Their Social Policy Implications in the San Francisco Bay Area. *UC Berkeley: University of California Transportation Center*. Retrieved from https://escholarship.org/uc/item/6mp941d9

Chen, X., & Jia, P. (2019). A comparative analysis of accessibility measures by the two-step floating catchment area (2SFCA) method. International Journal of Geographical Information Science, 33(9), 1739-1758. https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1591415

Church, A., Frost, M., & Sullivan, K. (2000). Transport and social exclusion in London. Transport Policy, 7(3), 195-205. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-070X(00)00024-X

Cui, M., & Levinson, D. (2020). Primal and Dual Access. Geographical Analysis, 52(3), 452-474. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gean.12220

Currie, G. (2010). Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. Journal of Transport Geography, 18(1), 31-41. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2008.12.002

Dai, D. (2010). Black residential segregation, disparities in spatial access to health care facilities, and late-stage breast cancer diagnosis in metropolitan Detroit. Health & Place, 16(5), 1038-1052. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2010.06.012

Dalvi, M. Q., & Martin, K. M. (1976). MEASUREMENT OF ACCESSIBILITY - SOME PRELIMINARY RESULTS. Transportation, 5(1), 17-42. https://doi.org/10.1007/bf00165245

Di Ciommo, F., & Shiftan, Y. (2017). Transport equity analysis. Transport Reviews, 37(2), 139-151. https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1278647

Dodson, J., Gleeson, B., Evans, R., & Sipe, N. (2007). Investigating the Social Dimensions of Transport Disadvantage II: From Concepts to Methods through an Empirical Case Study. Urban Policy and Research, 25(1), 63-89. https://doi.org/10.1080/08111140701225511

El-Geneidy, A., Cerdá, A., Fischler, R., & Luka, N. (2011). Evaluating the impacts of transportation plans using accessibility measures. Canadian Journal of Urban Research, 20, 81-104.

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

Farber, S., Morang, M. Z., & Widener, M. J. (2014). Temporal variability in transit-based accessibility to supermarkets. Applied Geography, 53, 149-159. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.012

Fortin, P., Morency, C., & Trépanier, M. (2016). Innovative GTFS Data Application for Transit Network Analysis Using a Graph-Oriented Method. Journal of Public Transportation, 19(4), 18-37. https://doi.org/https://doi.org/10.5038/2375-0901.19.4.2

Foth, N., Manaugh, K., & El-Geneidy, A. M. (2013). Towards equitable transit: examining transit accessibility and social need in Toronto, Canada, 1996–2006. Journal of Transport Geography, 29, 1-10. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.12.008

Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G., & Witlox, F. (2015). Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. Journal of Transport Geography, 48, 176-187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.09.008

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/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005

Giannotti, M., Tomasiello, D. B., & Bittencourt, T. A. (2022). The bias in estimating accessibility inequalities using gravity-based metrics. Journal of Transport Geography, 101, 103337. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103337

Guagliardo, M. F., Ronzio, C. R., Cheung, I., Chacko, E., & Joseph, J. G. (2004). Physician accessibility: an urban case study of pediatric providers. Health & Place, 10(3), 273-283. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2003.01.001

Guo, J., & Brakewood, C. (2024). Analysis of spatiotemporal transit accessibility and transit inequity of essential services in low-density cities, a case study of Nashville, TN. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 179, 103931. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103931

Hagerstrand, T. (1970). What about people in regional science[J]. Papers of the Regional Science Association, 24, 7-24. https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x

Handy, S. (1993) Regional versus Local Accessibility: Implications for Non-Work Travel. Transportation Research Record, 58-66.

Handy, S. L., & Niemeier, D. A. (1997). Measuring Accessibility: An Exploration of Issues and Alternatives. Environment and Planning A: Economy and Space, 29(7), 1175-1194. https://doi.org/10.1068/a291175

Hansen, W. G. (1959). HOW ACCESSIBILITY SHAPES LAND-USE. Journal of the American Institute of Planners, 25(2), 73-76. https://doi.org/10.1080/01944365908978307

Ingram, D. R. (1971). The concept of accessibility: A search for an operational form. Regional Studies, 5(2), 101-107. https://doi.org/10.1080/09595237100185131

Järv, O., Tenkanen, H., Salonen, M., Ahas, R., & Toivonen, T. (2018). Dynamic cities: Location-based accessibility modelling as a function of time. Applied Geography, 95, 101-110. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.009

Kapatsila, B., Palacios, M. S., Grisé, E., & El-Geneidy, A. (2023). Resolving the accessibility dilemma: Comparing cumulative and gravity-based measures of accessibility in eight Canadian cities. Journal of Transport Geography, 107, 103530. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103530

Khan, A. A. (1992). AN INTEGRATED APPROACH TO MEASURING POTENTIAL SPATIAL ACCESS TO HEALTH-CARE SERVICES. Socio-Economic Planning Sciences, 26(4), 275-287. https://doi.org/10.1016/0038-0121(92)90004-o

Klanfer, J. (1965). L' Exclusion sociale : etude de la marginalité dans les sociétés occidentales. Bureau de recherches sociales.

Klar, B., Lee, J., Long, J. A., & Diab, E. (2023). The impacts of accessibility measure choice on public transit project evaluation: A comparative study of cumulative, gravity-based, and hybrid approaches. Journal of Transport Geography, 106, 103508. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103508

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

Kwan, M.-P. (1998). Space-Time and Integral Measures of Individual Accessibility: A Comparative Analysis Using a Point-Based Framework. Geographical Analysis, 30, 191-216. https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1998.tb00396.x

Kwan, M.-P. (2013). Beyond Space (As We Knew It): Toward Temporally Integrated Geographies of Segregation, Health, and Accessibility. Annals of the Association of American Geographers, 103(5), 1078-1086. https://doi.org/10.1080/00045608.2013.792177

Lei, T., & Church, R. (2010). Mapping transit-based access: Integrating GIS, routes and schedules. International Journal of Geographical Information Science, 24, 283-304. https://doi.org/10.1080/13658810902835404

Levitas, R., Pantazis, C., Fahmy, E., Gordon, D., Lloyd, E., & Patsios, D. (2007). The Multi-Dimensional Analysis of Social Exclusion.

Li, C., & Wang, J. (2024). Measuring multi-activities accessibility and equity with accessibility-oriented development strategies. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 126, 104035. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.104035

Li, W., Guan, H., Qin, W., & Ji, X. (2023). Collective and individual spatial equity measure in public transit accessibility based on generalized travel cost. Research in Transportation Economics, 98, 101263. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.retrec.2023.101263

Li, X., Yang, Z., Guo, Y., Xu, W., & Qian, X. (2024). Factoring in temporal variations of public transit-based healthcare accessibility and equity. International Journal of Transportation Science and Technology, 13, 186-199. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.01.001

Litman, T. (2007). Evaluating Transportation Equity: Guidance for Incorporating Distributional Impacts in Transportation Planning. Social Research in Transport (SORT) Clearinghouse, 8.

Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now? Transport Policy, 20, 107-115. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.013

Lucas, K., van Wee, B., & Maat, K. (2016). A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. Transportation, 43(3), 473-490. https://doi.org/10.1007/s11116-015-9585-2

Luo, W., & Wang, F. H. (2003). Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study in the Chicago region. Environment and Planning B-Planning & Design, 30(6), 865-884. https://doi.org/10.1068/b29120

Mageau-Béland, J. (2019). Développement d'indicateurs de durabilité pour le transport en commun [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/4039/

Malekzadeh, A., & Chung, E. (2020). A review of transit accessibility models: Challenges in developing transit accessibility models. International Journal of Sustainable Transportation, 14(10), 733-748. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1625087

Martens, K. (2012). Justice in transport as justice in accessibility: Applying Walzer's 'Spheres of Justice' to the transport sector. Transportation, 39. https://doi.org/10.1007/s11116-012-9388-7

Meyer, L. H., & Roser, D. (2009). 219Enough for the Future. In Intergenerational Justice (pp. 0). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199282951.003.0009

Michaud, C. (2019). Méthode de diagnostic du niveau d'équité d'un réseau de transport collectif [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/3990/

Miller, H. J. (1999). Measuring Space-Time Accessibility Benefits within Transportation Networks: Basic Theory and Computational Procedures. Geographical Analysis, 31(1), 187-212. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gean.1999.31.1.187

Miller, H. J. (2005). Place-Based Versus People-Based Accessibility. In D. M. Levinson & K. J. Krizek (Eds.), Access to Destinations (pp. 63-89). Emerald Group Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/9780080460550-004

Moniruzzaman, M., & Páez, A. (2012). Accessibility to transit, by transit, and mode share: application of a logistic model with spatial filters. Journal of Transport Geography, 24, 198-205. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.02.006

Murray, A. T., & Wu, X. (2003). Accessibility tradeoffs in public transit planning. Journal of Geographical Systems, 5(1), 93-107. https://doi.org/10.1007/s101090300105

Owen, A., & Levinson, D. M. (2015). Modeling the commute mode share of transit using continuous accessibility to jobs. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 74, 110-122. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.02.002

Páez, A., Mercado, R., Farber, S., Morency, C., & Roorda, M. (2009). Mobility and Social Exclusion in Canadian Communities: An Empirical Investigation of Opportunity Access and Deprivation.

Páez, A., Scott, D. M., & Morency, C. (2012). Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. Journal of Transport Geography, 25, 141-153. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.03.016

Pereira, R. H. M., Schwanen, T., & Banister, D. (2017). Distributive justice and equity in transportation. Transport Reviews, 37(2), 170-191. https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1257660

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

Radke, J., & Mu, L. (2000). Spatial Decompositions, Modeling and Mapping Service Regions to Predict Access to Social Programs. Geographic Information Sciences, 6(2), 105-112. https://doi.org/10.1080/10824000009480538

Rahman, M., & Neema, M. N. (2015). A GIS Based Integrated Approach to Measure the Spatial Equity of Community Facilities of Bangladesh. AIMS Geosciences. 1. 21-40. https://doi.org/10.3934/geosci.2015.1.21

Rawls, J. (1971). A Theory of Justice

Original Edition. Harvard University Press. https://doi.org/10.2307/j.ctvjf9z6v

Rawls, J. (2001). Justice as Fairness

A Restatement. Harvard University Press. https://doi.org/10.2307/j.ctv31xf5v0

Scheurer, J., Curtis, C., & Porta, S. (2007). Spatial Network Analysis of Public Transport Systems: Developing a Strategic Planning Tool to Assess the Congruence of Movement and Urban Structure in Australian Cities. 30th Australasian Transport Research Forum.

Sen, A.K. (1992) Inequality Reexamined. Clarendon Press, Oxford.

Senegas, S., Furno, A., Palmas, P., & Simon, J. (2023). Framework for the Analysis and Enhancement of the Accessibility of Large-Scale Urban Transit Networks: A Data-Driven Study for the City of Lyon, France. Transportation Research Record, 2678(2), 35-47. https://doi.org/10.1177/03611981231172939

Stępniak, M., Pritchard, J. P., Geurs, K. T., & Goliszek, S. (2019). The impact of temporal resolution on public transport accessibility measurement: Review and case study in Poland. Journal of Transport Geography, 75, 8-24. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.01.007

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, 101633. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101633

Tao, Z., & Cheng, Y. (2016). **两步移**动搜寻法及其扩展形式研究进展(Research progress of the two-step floating catchment area method and extensions). **地理科学**进展, 35, 589-599. https://doi.org/10.18306/dlkxjz.2016.05.006

Tao, Z., Cheng, Y., & Liu, J. (2020). Hierarchical two-step floating catchment area (2SFCA) method: measuring the spatial accessibility to hierarchical healthcare facilities in Shenzhen, China. International Journal for Equity in Health, 19(1), 164. https://doi.org/10.1186/s12939-020-01280-7

Tenkanen, H., Saarsalmi, P., Järv, O., Salonen, M., & Toivonen, T. (2016). Health research needs more comprehensive accessibility measures: integrating time and transport modes from open data.

International Journal of Health Geographics, 15(1), 23. https://doi.org/10.1186/s12942-016-0052-x

Tomasiello, D. B., Giannotti, M., Arbex, R., & Davis, C. (2019). Multi-temporal transport network models for accessibility studies. Transactions in GIS, 23(2), 203-223. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/tgis.12513

Vickerman, R. W. (1974). Accessibility, Attraction, and Potential: A Review of Some Concepts and Their Use in Determining Mobility. Environment and Planning A: Economy and Space, 6(6), 675-691. https://doi.org/10.1068/a060675

Wang, F. (2000). Modeling Commuting Patterns in Chicago in a GIS Environment: A Job Accessibility Perspective. The Professional Geographer, 52, 120-133. https://doi.org/10.1111/0033-0124.00210

Wee, G., & Geurs, K. (2011). Discussing Equity and Social Exclusion in Accessibility Evaluations. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 11. https://doi.org/10.18757/ejtir.2011.11.4.2940

Wessel, N., & Farber, S. (2019). On the accuracy of schedule-based GTFS for measuring accessibility. Journal of Transport and Land Use, 12. https://doi.org/10.5198/jtlu.2019.1502

Widener, M., Farber, S., Neutens, T., & Horner, M. (2015). Spatiotemporal accessibility to supermarkets using public transit: An interaction potential approach in Cincinnati, Ohio. Journal of Transport Geography, 42. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.11.004

Widener, M., Minaker, L., Farber, S., Allen, J., Vitali, B., Coleman, P., & Cook, B. (2017). How do changes in the daily food and transportation environments affect grocery store accessibility? Applied Geography, 83, 46-62. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.018

Yamashita, J., Seto, T., Iwasaki, N., & Nishimura, Y. (2023). Quality assessment of volunteered geographic information for outdoor activities: an analysis of OpenStreetMap data for names of peaks in Japan. Geo-spatial Information Science, 26(3), 333-345. https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2085188

Yang, Z., Guo, Y., Feng, X., Zhou, Y., Zhou, P., Li, X., & Qian, X. (2024). Evaluating temporal variations in access to multi-tier hospitals using personal vehicles and public transit: Implications

for healthcare equity. Sustainable Cities and Society, 113, 105687. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105687

Zhang, Y., Cao, M., Cheng, L., Gao, X., & De Vos, J. (2022). Exploring the temporal variations in accessibility to health services for older adults: A case study in Greater London. Journal of Transport & Health, 24, 101334. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101334

ANNEXE A CHOIX DE LA FONCTION DE FRICTION

Trois fonctions de friction sont testées avec sept paramétrages différents (correspondant à sept seuils temporels). Les trois fonctions de friction testées sont : la fonction gaussienne, la fonction exponentielle négative et la fonction puissance inverse. Leur équation générale est donnée ci-dessous :

Fonction gaussienne : $GAUSS(t_{ij}) = \frac{e^{-0.5\times(t_{ij}/T_0)^2} - e^{-0.5}}{1 - e^{-0.5}}$ (33)

Fonction exponentielle négative : $EXP(t_{ij}) = e^{-\frac{t_{ij}}{\beta}}$ (34)

Fonction puissance inverse : $POW(t_{ij}) = (t_{ij})^{-\beta}$ (35)

Plusieurs formes existent pour la fonction gaussienne, la formulation choisie est celle de la version gaussienne de la mesure 2SFCA (G2SFCA) (Dai, 2010; Li et Wang, 2024). Elle présente l'avantage d'intégrer directement le seuil temporel T_0 à son expression. L'autre formulation $e^{-t_{ij}^2/\beta}$ intègre un paramètre β qui est finalement égal à $T_0^2/0.5$. La formulation choisie prend la forme $a \times e^{-t_{ij}^2/\beta} + b$.

Les sept seuils temporels testés sont les suivants (en minutes) : 15; 17,5; 20; 22,5; 25, 27,5; 30. Les paramètres β en découlant sont fixés selon la méthode de Kwan (1998) ou Klar et al. (2023), suggérant que la fonction de friction soit calibrée sur une valeur minimale lorsque le temps de trajet atteint le seuil temporel T_0. La valeur choisie est 0,01 qui est considéré comme une valeur critique quand la fonction décroit vers 0 (Chen et Jia, 2019). Le Tableau A-1 résume les fonctions et leur paramètre (EXP et POW), selon le seuil temporel choisi.

Tableau A-1 : Résumé des fonctions de frictions testées

Fonction	T_0	β
EXP	15	3,26
	17.5	3,80
	20	4,34
	22.5	4,89
	25	5,43
	27.5	5,97
	30	6,51
POW	15	1,70
	17.5	1,61
	20	1,54
	22.5	1,48
	25	1,43
	27.5	1,39
	30	1,35

Les trois fonctions de frictions calculées pour les sept seuils temporels sont représentées sur les Figure A-1, Figure A-2 et Figure A-3.

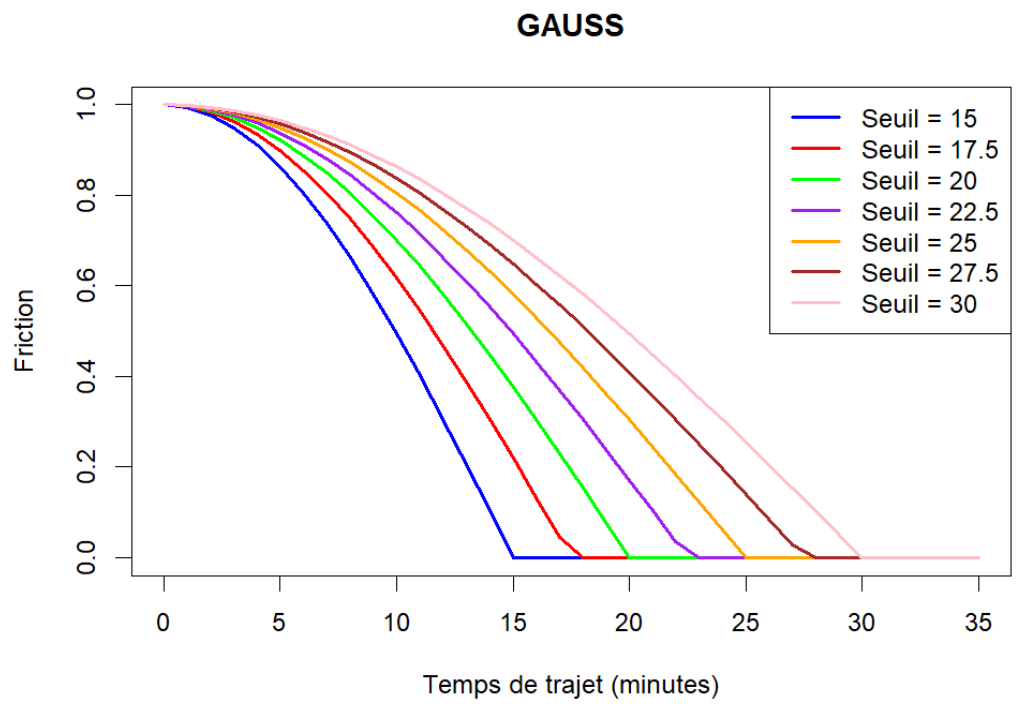


Figure A-1 : Fonctions de friction gaussiennes

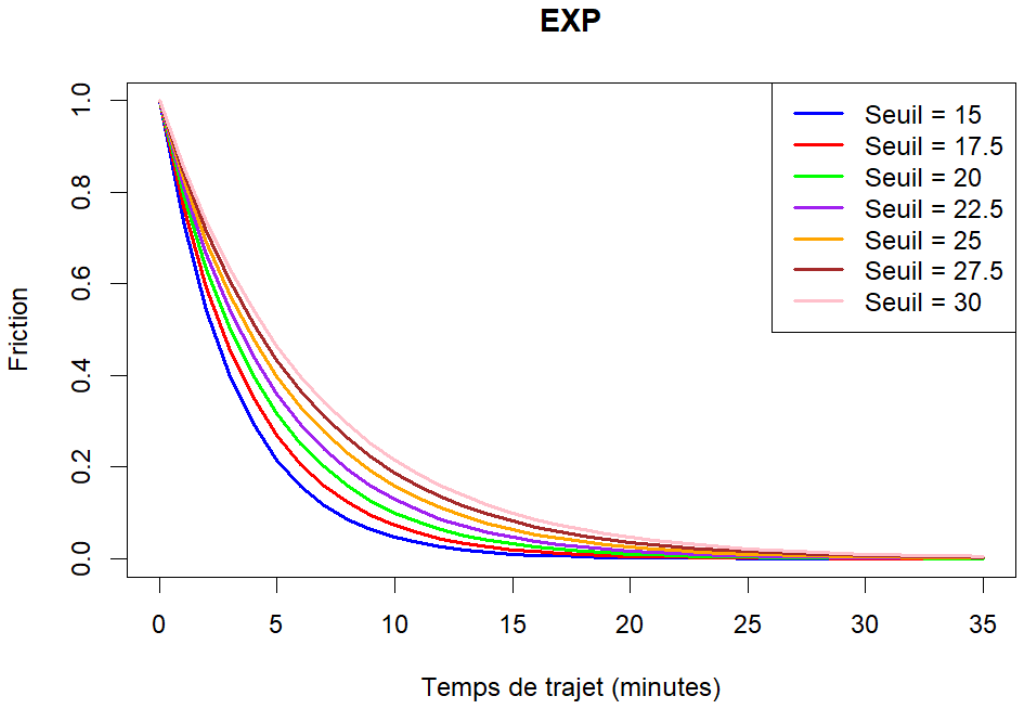


Figure A-2 : Fonctions de friction exponentielles

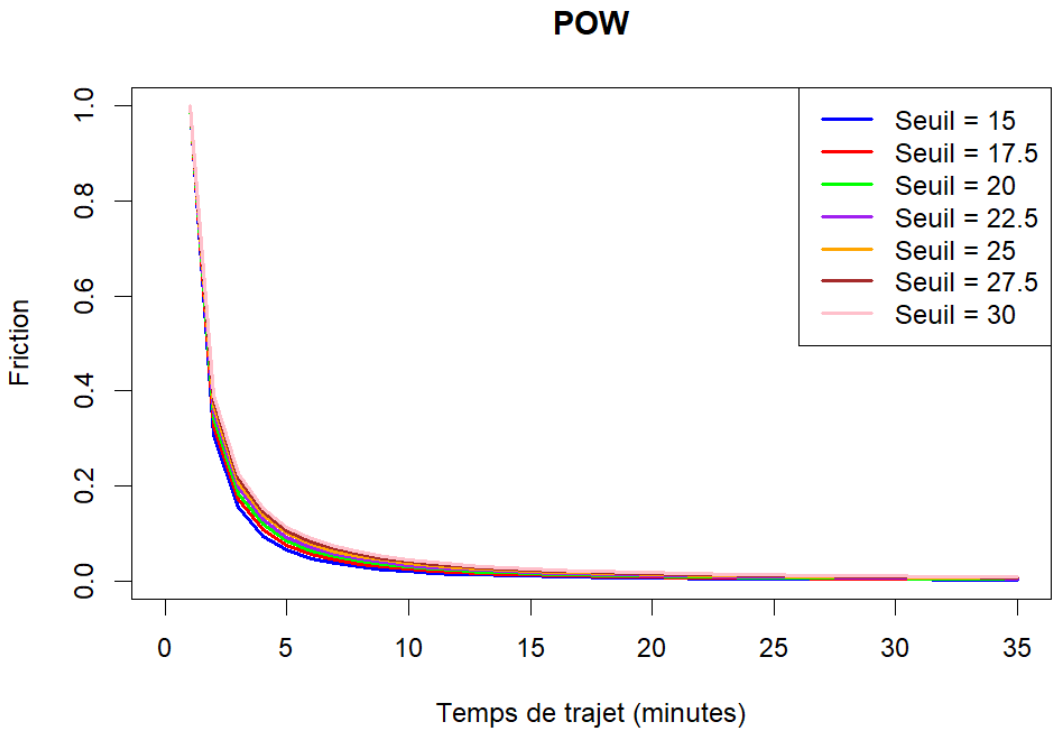


Figure A-3 : Fonctions de friction puissances inverses

Les trois fonctions de frictions se comportent différemment. Les trois sont tracées sur le graphique suivant, avec un seuil temporel de 25 minutes.

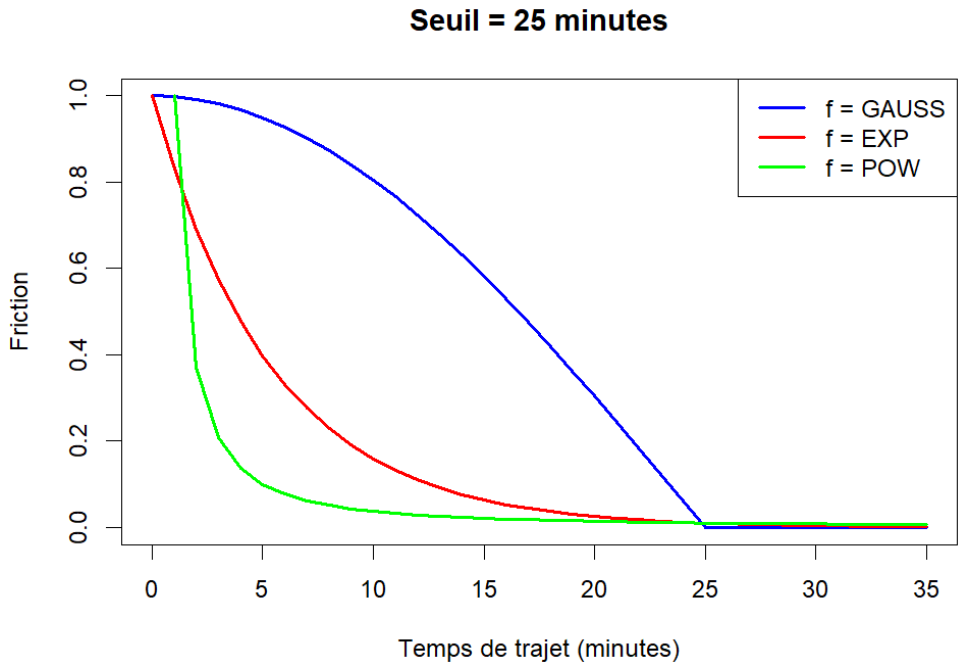


Figure A-4 : Fonctions de friction gaussienne, exponentielle et puissance inverse

Quelques remarques surviennent à la vue de ces courbes. Premièrement, la fonction Gaussienne est la seule à présenter l'avantage de varier de 1 à 0 tandis que les deux autres n'atteignent pas le 0 et varient peu de 15 à 25 minutes de temps de trajet. De plus, ces deux dernières décroient fortement entre 0 et 5 minutes de temps de trajet (la fonction POW décroit presque jusqu'à 0.3 à 5 minutes).

L'objectif de cette partie est de fixer une fonction de friction qui sera utilisée pour toute la suite de l'étude qui porte sur quatre mesures dans quatre cadres statiques-dynamiques. Pour ne pas complexifier cette évaluation des fonctions de friction, les trois indicateurs présentés ensuite sont étudiés sur les quatre mesures, uniquement dans le cadre statique-dynamique SD2 qui met en jeu le transport de façon dynamique puis les opportunités et la population de façon statique. Ce cadre d'étude est choisi puisque seul le transport est dynamique, qui est le paramètre intervenant dans les fonctions de friction. Les valeurs d'accessibilité calculées ici se basent sur la suite de la méthodologie.

Pour chaque mesure d'accessibilité, trois indicateurs sont calculés. Ces indicateurs sont utilisés par Chen et Jia (2019) pour comparer différentes fonctions de friction sur une mesure 2SFCA. Ils sont les suivants :

- Coefficient de corrélation de Spearman pour chaque paire de fonctions de friction
- Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error (RMSE)) :

  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (A_i - \langle A_i \rangle)^2}{n}}$ Où les i sont les points d'origines des mesures et $\langle A_i \rangle$ la moyenne de A_i obtenue avec chaque fonction de friction.

- Coefficient de variation :

  $C_v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_1^n (A_i - \langle A \rangle)^2}{n-1}}}{\langle A \rangle}$ Où les i sont les points d'origines des mesures et $\langle A \rangle$ la moyenne des A_i obtenues pour tous les points d'origines.

L'accessibilité est calculée entre 7 :00 et 22 :00 toutes les 15 minutes, ainsi sont les indicateurs précédents sont moyennés sur la journée. En effet, une étude plus approfondie de ces derniers et de leurs variations sur la journée pourrait être menée mais ce n'est pas l'objectif de cette partie.

Le Tableau A-2 montre les corrélations de Spearman obtenues pour chaque paire de fonctions de frictions avec la mesure gravitaire, à titre d'exemple. Une table par mesure est calculée et les

résultats sont lourds à analyser. Ainsi ils sont résumés dans le Tableau A-3 qui classent les moyennes des corrélations de Spearman, par fonction de friction et par mesure.

Tableau A-2 : Coefficients de corrélations de Spearman entre les mesures d'accessibilités gravitaires obtenues avec les différentes fonctions de friction

		GAUSS							EXP							POW					
	T	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30	15	17,5	20	22,5	25	27,5
GAUSS	17,5	0,98																			
	20	0,94	0,98																		
	22,5	0,91	0,96	0,99																	
	25	0,87	0,93	0,97	0,99																
	27,5	0,85	0,90	0,95	0,98	0,99															
	30	0,82	0,88	0,93	0,96	0,99	1,00														
EXP	15	0,99	0,96	0,92	0,88	0,85	0,82	0,80													
	17,5	0,97	0,98	0,95	0,92	0,89	0,87	0,85	0,98												
	20	0,96	0,97	0,97	0,95	0,93	0,90	0,88	0,97	0,99											
	22,5	0,95	0,97	0,97	0,97	0,95	0,93	0,91	0,96	0,98	0,99										
	25	0,95	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00									
	27,5	0,94	0,96	0,97	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,96	0,98	0,99	1,00								
	30	0,93	0,96	0,97	0,98	0,98	0,97	0,96	0,92	0,95	0,98	0,99	1,00	1,00							
POW	15	0,98	0,98	0,96	0,93	0,90	0,87	0,85	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94						
	17,5	0,93	0,98	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,92	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95					
	20	0,89	0,94	0,98	0,99	0,98	0,97	0,95	0,87	0,92	0,95	0,96	0,97	0,97	0,97	0,91	0,96				
	22,5	0,85	0,90	0,94	0,98	0,99	0,99	0,98	0,84	0,88	0,92	0,95	0,96	0,96	0,97	0,87	0,93	0,97			
	25	0,83	0,88	0,92	0,95	0,98	0,99	0,99	0,82	0,86	0,90	0,92	0,94	0,96	0,96	0,85	0,90	0,95	0,98		
	27,5	0,82	0,86	0,90	0,94	0,97	0,98	0,99	0,80	0,84	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,84	0,89	0,94	0,97	0,99	
	30	0,81	0,86	0,90	0,93	0,96	0,98	0,99	0,80	0,84	0,87	0,90	0,92	0,94	0,95	0,83	0,88	0,93	0,96	0,98	1,00

Tableau A-3 : Coefficients de corrélation de Spearman moyens pour chaque mesure d'accessibilité et chaque fonction de friction

OC		Grav		2SFCA		M2SFCA	
T	Corr. Moy	f	Corr. Moy	f	Corr. Moy	f	Corr. Moy
22,5	0,916	EXP30	0,964	EXP30	0,944	EXP30	0,956
25	0,912	EXP27	0,964	EXP27	0,944	EXP27	0,954
20	0,907	EXP25	0,961	EXP25	0,941	EXP25	0,950
27,5	0,902	GAUSS22	0,956	EXP22	0,934	GAUSS20	0,947
30	0,896	EXP22	0,956	GAUSS22	0,933	GAUSS22	0,945
17,5	0,874	GAUSS20	0,954	GAUSS20	0,928	EXP22	0,945
15	0,816	GAUSS25	0,949	GAUSS25	0,926	POW17	0,939
		POW20	0,948	EXP20	0,920	POW20	0,939
		EXP20	0,945	POW20	0,915	GAUSS17	0,938
		POW17	0,943	GAUSS27	0,910	GAUSS25	0,937
		POW22	0,940	GAUSS17	0,908	EXP20	0,937
		GAUSS17	0,938	POW17	0,908	POW22	0,930
		GAUSS27	0,938	POW22	0,906	EXP17	0,924
		POW25	0,928	EXP17	0,897	GAUSS27	0,924
		EXP17	0,927	GAUSS30	0,891	POW15	0,923
		GAUSS30	0,926	POW25	0,889	POW25	0,919
		POW15	0,919	POW15	0,877	GAUSS15	0,913
		POW27	0,917	POW27	0,873	POW27	0,910
		POW30	0,912	GAUSS15	0,869	GAUSS30	0,906
		GAUSS15	0,909	POW30	0,866	POW30	0,906
		EXP15	0,898	EXP15	0,859	EXP15	0,901

L'étude des corrélations de Spearman permet d'analyser les corrélations entre les répartitions de l'accessibilité sur le territoire, calculées à partir des différentes fonctions de friction. Finalement, toutes les mesures sont très corrélées, ce qui signifie que la répartition de l'accessibilité sur le territoire est peu impactée par la fonction de friction choisie. Cela ne témoigne cependant pas des différences d'amplitude entre les zones de hautes et de faibles accessibilités, qui seront analysées avec le coefficient de variation. Globalement les meilleurs résultats sont obtenus avec la fonction de friction exponentielle négative et la fonction gaussienne (pour les seuils temporels intermédiaires de 20, 22.5 et 25 minutes) : ce sont les fonctions de frictions qui représentent le mieux l'ensemble des fonctions, en termes de répartition de l'accessibilité. Le Tableau A-4 montre

les erreurs quadratiques moyennes obtenues avec chaque mesure d'accessibilité et chaque fonction de friction.

Tableau A-4 : Erreurs quadratiques moyennes pour chaque mesure d'accessibilité et chaque fonction de friction

OC		Grav		2SFCA		M2SFCA	
T	RMSE	f	RMSE	f	RMSE	f	RMSE
22,5	308	EXP30	92	EXP27	0,0047	EXP30	0,0032
20	549	EXP27	135	EXP30	0,0048	EXP27	0,0039
25	605	GAUSS15	140	EXP25	0,0058	EXP25	0,0048
27,5	936	EXP25	178	GAUSS20	0,0084	EXP22	0,0059
17,5	942	GAUSS17	209	GAUSS22	0,0086	EXP20	0,0072
30	1082	EXP22	219	EXP22	0,0089	EXP17	0,0087
15	1210	EXP20	256	POW20	0,0091	EXP15	0,0103
		EXP17	289	POW17	0,0098	POW15	0,0118
		EXP15	316	GAUSS25	0,0104	POW17	0,0119
		POW30	347	POW22	0,0112	POW20	0,0119
		GAUSS20	349	GAUSS17	0,0116	POW22	0,0120
		POW27	350	GAUSS27	0,0125	POW30	0,0120
		POW25	355	POW25	0,0130	POW25	0,0120
		POW22	361	EXP20	0,0134	POW27	0,0120
		POW20	368	GAUSS30	0,0141	GAUSS27	0,0132
		POW17	374	POW27	0,0142	GAUSS25	0,0132
		POW15	378	POW30	0,0146	GAUSS30	0,0137
		GAUSS22	539	POW15	0,0150	GAUSS22	0,0139
		GAUSS25	762	GAUSS15	0,0188	GAUSS20	0,0151
		GAUSS27	997	EXP17	0,0196	GAUSS17	0,0166
		GAUSS30	1219	EXP15	0,0277	GAUSS15	0,0190

Le Tableau A-4 représente les écarts entre l'accessibilité mesurée avec une fonction de friction et la moyenne des accessibilités mesurées avec toutes les fonctions. Il est classé des plus faibles aux plus grandes RMSE. A quelques exceptions près, les résultats sont meilleurs avec la fonction exponentielle négative et moins bons avec la fonction gaussienne. Finalement, cette analyse n'est pas pertinente pour cette recherche. Les valeurs d'accessibilité mesurées avec la fonction gaussienne sont naturellement plus hautes d'après la définition de la fonction. De plus les valeurs brutes d'accessibilité sont peu pertinentes à partir du moment où les mesures gravitaire, 2SFCA et

M2SFCA sont peu interprétables. Des seuils d'accessibilité seront fixés par la suite pour une analyse d'équité basée sur le principe suffisantiste, mais la méthode n'est pas impactée par ces différences de mesures. Enfin, le Tableau A-5 présente les coefficients de variation pour chaque fonction de friction et chaque mesure d'accessibilité.

Tableau A-5 : Coefficients de variations pour chaque mesure d'accessibilité et chaque fonction de friction

OC		Grav		2SFCA		M2SFCA	
T	Cv	f	Cv	f	Cv	f	Cv
27,5	0,927	**GAUSS30**	0,919	**POW30**	0,791	**GAUSS30**	0,896
30	0,928	**GAUSS27**	0,927	**POW27**	0,799	**GAUSS27**	0,945
25	0,930	**POW30**	0,934	**GAUSS30**	0,801	**GAUSS25**	1,014
22,5	0,945	**POW27**	0,936	**POW25**	0,828	**POW30**	1,022
20	0,972	**POW25**	0,945	**GAUSS27**	0,828	**POW27**	1,039
17,5	1,012	**GAUSS25**	0,945	**GAUSS25**	0,879	**POW25**	1,083
15	1,092	**POW22**	0,967	**POW22**	0,891	**GAUSS22**	1,108
		GAUSS22	0,978	**GAUSS22**	0,965	**POW22**	1,160
		POW20	1,006	**EXP30**	0,967	**GAUSS20**	1,219
		GAUSS20	1,030	**POW20**	0,996	**POW20**	1,284
		EXP30	1,038	**EXP27**	1,011	**GAUSS17**	1,360
		POW17	1,063	**GAUSS20**	1,075	**POW17**	1,404
		EXP27	1,072	**EXP25**	1,079	**GAUSS15**	1,560
		GAUSS17	1,110	**POW17**	1,122	**POW15**	1,565
		EXP25	1,122	**EXP22**	1,177	**EXP30**	1,619
		POW15	1,156	**GAUSS17**	1,211	**EXP27**	1,735
		EXP22	1,194	**POW15**	1,302	**EXP25**	1,874
		GAUSS15	1,234	**EXP20**	1,307	**EXP22**	2,043
		EXP20	1,294	**GAUSS15**	1,412	**EXP20**	2,245
		EXP17	1,431	**EXP17**	1,466	**EXP17**	2,487
		EXP15	1,617	**EXP15**	1,674	**EXP15**	2,792

Les résultats sont encore une fois classés du plus petit au plus grand coefficient de variation. Globalement les coefficients de variation sont plus faibles quand le seuil temporel augmente. De plus, les fonctions de friction qui présentent les plus faibles coefficients de variation sont la fonction gaussienne et la fonction puissance inverse. Pour cette recherche, une fonction de friction permettant des plus faibles coefficients de variation est priorisée. L'idée est de pouvoir mieux saisir

les variations dues à l'intégration des dynamiques urbaines et d'être moins dépendant de la fonction de friction.

Finalement, la fonction de friction choisie est la fonction gaussienne. Le seuil temporel sélectionné est 25 minutes : c'est un entre-deux qui permet une bonne corrélation avec les autres fonctions et un faible coefficient de variation.

ANNEXE B ATTRIBUTION DE POIDS AUX COMMERCES

La première méthode pour calculer ces superficies est le rapprochement spatial des points commerces avec la liste des unités d'évaluation foncière, qui existe au format shapefile, et regroupe l'intégralité des bâtiments de l'île de Montréal en une couche de polygones. Finalement, cela n'est pas possible car la superficie au sol des bâtiments du rôle d'évaluation foncière n'est pas représentative de la surface réelle des commerces. Deux exemples sont présentés ci-dessous pour représenter le problème.

Premier exemple : un commerce extrait d'OpenStreetMap en tant que polygone est comparé au polygone du bâtiment du rôle d'évaluation foncière qu'il superpose.



Figure B-1 : Première comparaison d'un polygone OSM à un polygone d'évaluation foncière

Le commerce OpenStreetMap est en jaune sur la Figure B-1, les polygones de la liste des unités d'évaluation foncière sont en roses. Il n'y a visuellement pas de doute sur la non-correspondance du polygone jaune avec le polygone rose qu'il superpose. De plus, il n'y a pas de relation de proportionnalité (ou quelconque relation) entre la superficie des commerces OpenStreetMap et ceux du rôle d'évaluation foncière. Cela n'a pas été méthodiquement vérifié, mais est visuellement pris pour acquis.

Cependant, un doute persiste sur le bon placement du commerce, pouvant être à l'origine de la non-correspondance des superficies. Le deuxième exemple réfute cette idée.

Deuxième exemple : l'épicerie la plus accessible personnellement est dessinée manuellement dans QGIS et comparée au polygone correspondant de la liste d'unités d'évaluation foncière.

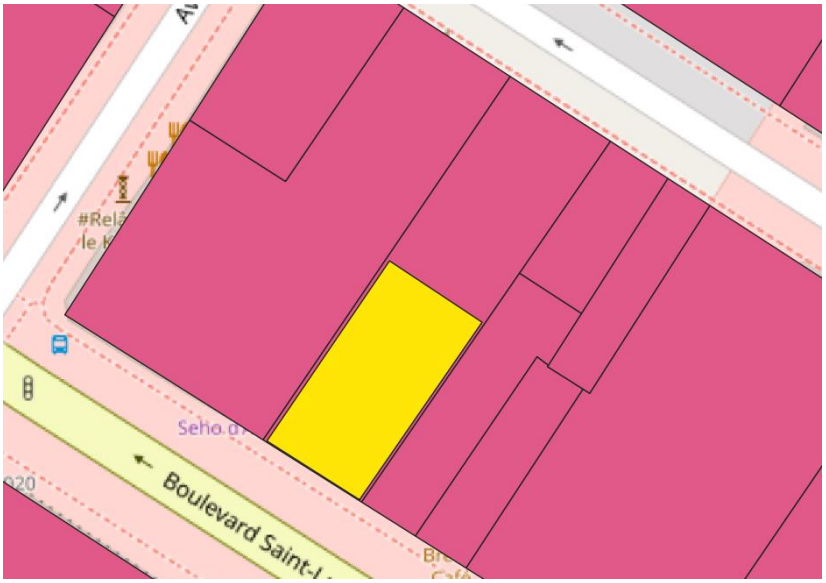


Figure B-2 : Deuxième comparaison d'un polygone OSM à un polygone d'évaluation foncière

Dans ce second cas, le constat est le même : le polygone rose présente une superficie environ deux fois plus grande que celle du polygone jaune. Le mauvais placement du commerce ne peut pas être à l'origine de la non-correspondance des superficies.

Il n'est pas possible de rapprocher les points commerces OpenStreetMap aux bâtiments de la liste des unités d'évaluation foncière pour récupérer les superficies correspondantes, puisque celles-ci ne correspondent pas aux valeurs recherchées.

Ainsi, la solution serait de trouver une autre base de données permettant ce rapprochement. Cela n'est pas possible pour différentes raisons. Premièrement, aucun attribut des commerces OpenStreetMap ne permet le rapprochement de ces points avec une autre base de données. Deuxièmement, le rapprochement spatial avec d'autres données n'est pas possible : les points mal placés sur la carte sont trop nombreux. Comme expliqué précédemment, les commerces OpenStreetMap sont en majorité des points et dans certains cas des polygones agrégés en leur centroïde. En observant spatialement les données, il est remarquable que les points n'étant pas issus de polygones ont tendances à être placés proche de l'entrée du commerce. Ainsi, 53 commerces de type « supermarket » ont été sélectionnés, pour lesquels l'entrée a été replacée manuellement à sa véritable localisation. Les distances entre les points OpenStreetMap et les entrées replacées ont été

calculées à vol d'oiseau. La manipulation retourne 49 résultats sur 53, voici la distribution des distances :

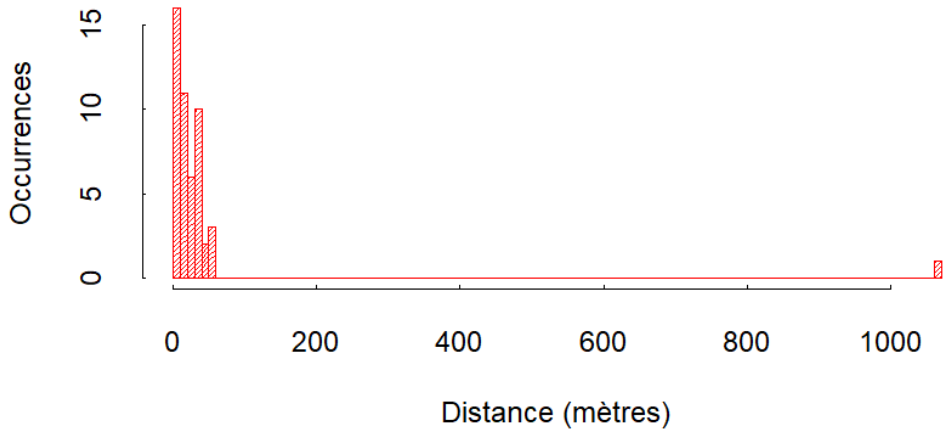


Figure B-3 : Distances entre les points OSM et les entrées replacées

Premièrement, une occurrence présente un décalage de plus d'un kilomètre. Ce décalage est assez fréquent, il est déjà apparu lors de précédentes manipulations des données. Voici la distribution des autres distances, en dessous de 70 mètres de décalage :

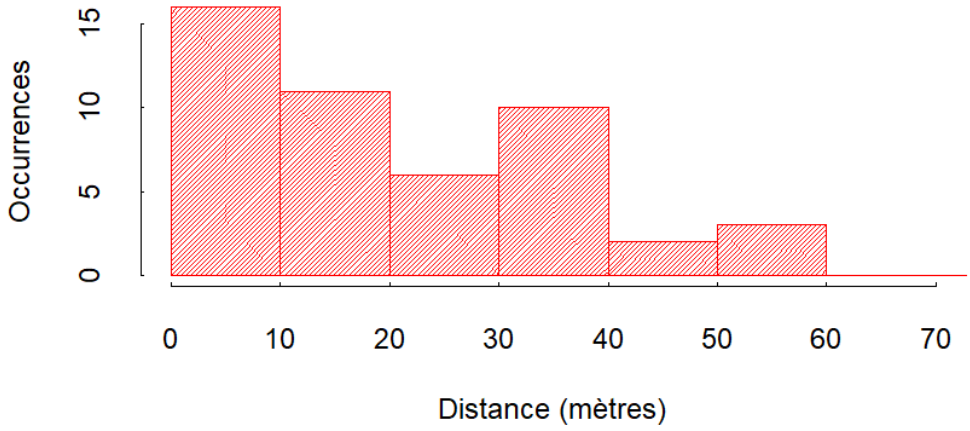


Figure B-4 : Distances entre les points OSM et les entrées replacées (moins de 70 mètres)

Plus de la moitié des écarts sont de moins de 20 mètres, ce qui traduit tout de même un bon positionnement des points OpenStreetmap. Cependant, une partie non négligeable des points sont placés à plus de 30 mètres de la véritable entrée. Un point peut être à plus de 30 mètres de sa véritable entrée pour différentes raisons (applicable aux points présentant des écarts plus faibles) : il est placé ailleurs dans le polygone du commerce, ou il est placé ailleurs en dehors du polygone du commerce. Cette distribution des distances ne prouve pas qu'il y ait un mauvais placement systématique des points sur OpenStreetMap mais n'indique pas non plus que les exemples de mauvais placements rencontrés sont des cas rares, des valeurs aberrantes. Voici une illustration de ce qui peut se produire :

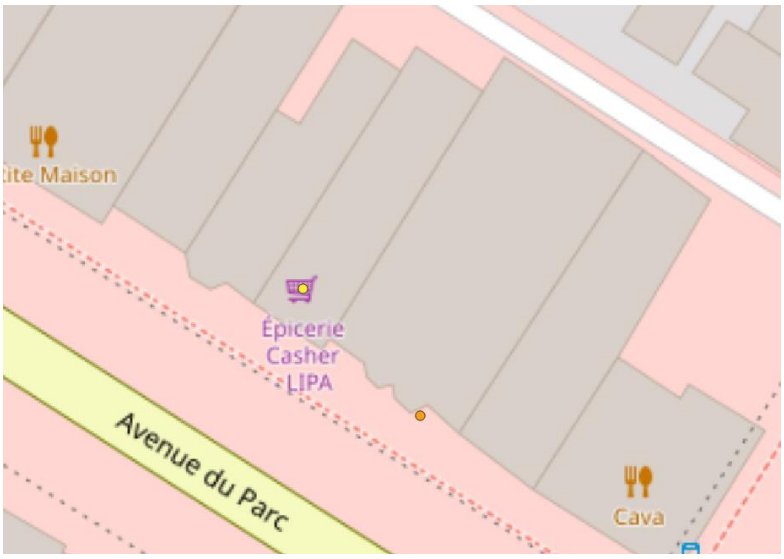


Figure B-5 : Exemple d'un point replacé

Dans ce cas, le point jaune est le point OpenStreetMap et le point orange est l'entrée replacée. Ce léger décalage d'une cinquantaine de mètres entraîne une mauvaise identification du commerce et de ses attributs, telle que la superficie qui varie du simple au double dans ce cas.

Ainsi, il n'est pas possible de procéder à un rapprochement spatial entre la base de données commerces issue d'OpenStreetMap et une quelconque autre base de données permettant de récupérer les superficies. La base de données OSM n'a pas été remplacée par une autre car les points OSM étaient impliqués en parallèle dans de nombreux calculs de temps de trajet.

Les superficies ont été attribuées à chaque commerce selon une autre méthode, décrite ci-dessous. Pour rappel, la base de données des commerces est le résultat de l'extraction de différents types de

commerces via Overpass Turbo : "shop"="supermarket"; "shop"="greengrocer"; "shop"="farm"; "shop"="deli". Ainsi, les commerces ont été regroupés en quatre catégories : une valeur de superficie commune est attribuée aux commerces d'une même catégorie. Les quatre catégories sont les suivantes :

Tableau B-1 : Catégories de commerces par extraction OSM

Catégorie 1	"shop"="deli"
Catégorie 2	"shop"="greengrocer" & "shop"="farm"
Catégorie 3	"shop"="supermarket" \ {Catégorie 4}
Catégorie 4	"shop"="supermarket" & "name" = "IGA" | "L'Intermarché" | "Maxi" | "Metro" | "Provigo" | "PA" | "Super C" | "Walmart"

L'attribution d'une superficie à chaque catégorie de commerces est le résultat d'une analyse descriptive d'un échantillon de commerces, pour chaque catégorie. Les échantillons ont été formés non aléatoirement à partir des données extraites d'OpenStreetMap. En effet, comme précisé à plusieurs reprises les commerces extraits d'OpenStreetMap sont en majorité des points, mais une partie sont des polygones. Ce sont ces polygones et leur superficie qui sont analysés par catégorie. Chacune présente une taille d'échantillon variée, et certaines disposent de peu de données. Les tailles d'échantillon sont les suivantes : n=4 (catégorie 1), n=9 (catégorie 2), n=27(catégorie 3), n=44 (catégorie 4). Les résultats sont donc à analyser avec précaution. Les superficies sont calculées avec QGIS et dépendamment du système de projection, les résultats sont donnés en m² ou en degrés carrés.

La Figure B-6 présente la distribution des superficies par catégorie. Ces superficies sont données en degrés carrés :

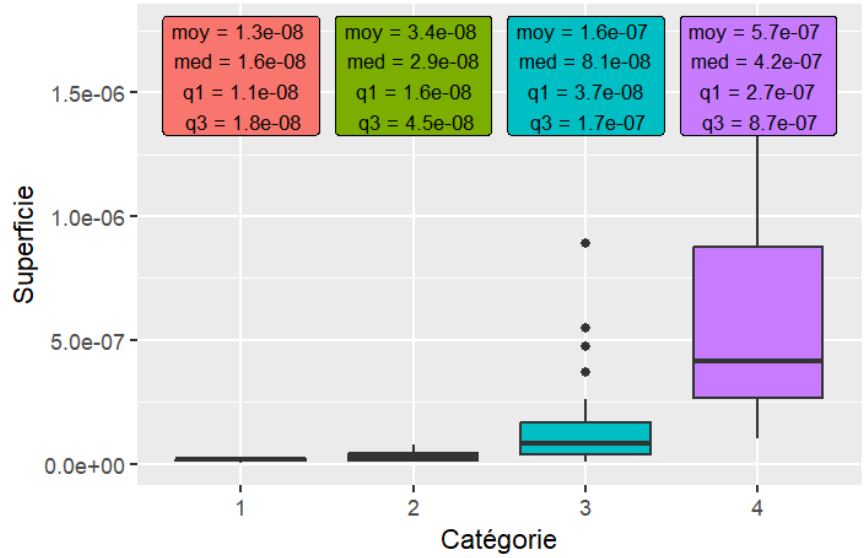


Figure B-6 : Distribution des superficies par catégorie

Et une meilleure visualisation de la distribution des superficies pour les catégories 1 et 2 :

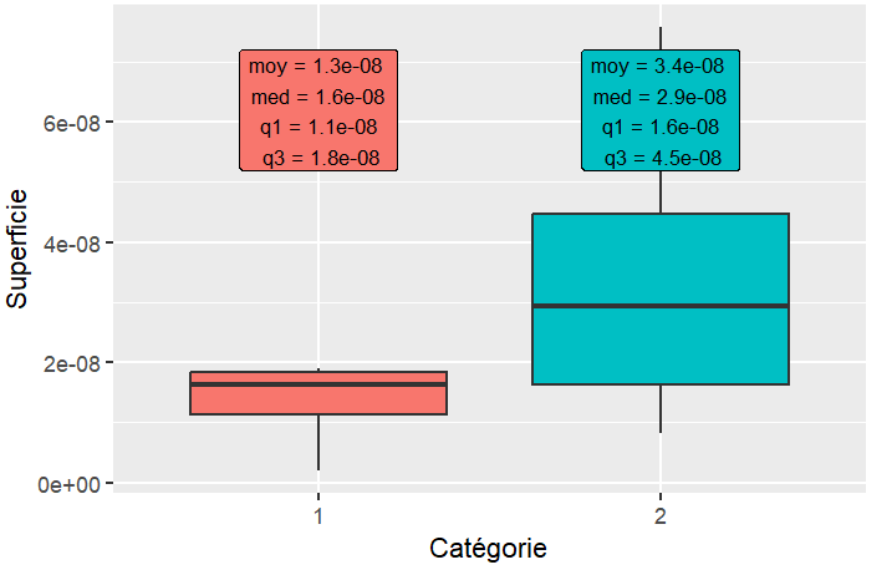


Figure B-7 : Distribution des superficies par catégorie (1 et 2)

D'après ces distributions de valeurs, les catégories regroupent des commerces de superficies distinctes. Le troisième quartile de chaque catégorie est du même ordre de grandeur ou inférieur au premier quartile de la catégorie supérieure. Malgré une proportion non négligeable de commerces de même superficie inter-catégories, la distinction des groupes est considérée suffisante dans le cadre de cette étude. En effet, une mesure d'accessibilité en un point à un instant donné est relative

aux autres mesures en d'autres points. De plus, l'objectif de cette étude est une comparaison de mesures d'accessibilité, à partir de sources de données identiques. L'analyse se base sur une représentation approximative de l'île de Montréal. Ainsi, les superficies attribuées aux commerces de chaque catégorie sont les suivantes :

Tableau B-2 : Superficie des commerces par catégorie

Catégorie	Superficie
1	1,3e-08
2	3,4e-08
3	1,6e-07
4	5,7e-07

Les valeurs utilisées sont les moyennes, car une variation d'accessibilité induite par une variation de superficies est proportionnelle à la moyenne des superficies.

Pour des résultats plus concrets, voici le même tableau avec les valeurs converties en m² :

Tableau B-3 : Superficie des commerces par catégorie (en m²)

Catégorie	Superficie
1	113 m²
2	295 m²
3	1390 m²
4	4950 m²