



**Titre:** Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport  
Title:

**Auteur:** Jana Abou Taam  
Author:

**Date:** 2024

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Abou Taam, J. (2024). Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport  
Citation: [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
<https://publications.polymtl.ca/59279/>

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

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/59279/>  
PolyPublie URL:

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

**Programme:** Génie civil  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport**

**JANA ABOU TAAM**

Département des génies civil, géologique et des mines

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

Génie Civil

Août 2024

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

## **Définir et mesurer la multimodalité de l'offre de transport**

présenté par **Jana ABOU TAAM**

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

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

**Martin TRÉPANIÉ**, président

**Catherine MORENCY**, membre et directrice de recherche

**Jean-François CANTIN**, membre externe

## REMERCIEMENTS

Je tiens d’abord à exprimer ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Catherine Morency, pour ses enseignements, son soutien, ses conseils précieux, et les nombreuses opportunités qu’elle m’a offertes.

Merci également aux associés de recherche, notamment Jean-Simon Bourdeau, pour son aide précieuse avec le prétraitement des données.

Je souhaite aussi remercier les partenaires de la Chaire Mobilité pour avoir fourni une grande partie des données nécessaires à cette recherche.

Sur un plan plus personnel, je remercie ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements, ainsi que mes amis et camarades étudiants Elisa, Héloïse, Antoine et Victor pour leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

## RÉSUMÉ

La multimodalité est un concept qui peut décrire l'offre, la demande et les politiques de transport. Une offre multimodale désigne un système de transport proposant plusieurs options de modes de transport. Une demande multimodale décrit des individus utilisant divers modes de transport. Les politiques de transport multimodales sont des mesures qui visent à augmenter ces deux types de multimodalité.

La multimodalité prend une importance croissante dans le domaine du transport pour diverses raisons, principalement celle de l'attention portée à la diminution de la dépendance à l'automobile privée, au profit du transport en commun et des modes actifs et partagés. L'augmentation de la multimodalité présente de nombreux avantages environnementaux et sociaux, et permet également d'améliorer les systèmes de transport eux-mêmes, en augmentant leur résilience, sécurité et vitesse entre autres.

Pour mettre en œuvre des stratégies visant à accroître la multimodalité, il est essentiel de pouvoir la définir et la quantifier afin de mesurer son évolution. Plusieurs indicateurs de mesure de la demande ont été établis, testés et appliqués dans la littérature. En revanche, peu d'articles se concentrent sur la mesure de la multimodalité de l'offre de transport et ceux qui existent prennent en compte principalement la présence et l'accessibilité des infrastructures, sans considérer le niveau de service de ces différents modes. L'objectif de cette étude est donc de développer un indicateur permettant de mesurer la multimodalité de l'offre de transport qui tient compte de la qualité de service des modes et qui soit adapté au contexte montréalais.

Ce mémoire propose une méthodologie pour évaluer la multimodalité de l'offre de transport par zone, en se basant sur des indicateurs établis pour chaque mode. Pour chaque mode, trois éléments sont pris en compte : la disponibilité du mode dans la zone, l'accessibilité au mode au sein de la zone, et la qualité de service du mode dans la zone. Ensuite, les zones étudiées sont classifiées selon ces indicateurs, et les groupes sont comparés pour établir un classement des groupes selon leur multimodalité.

Plusieurs systèmes de division du territoire sont considérés pour évaluer les effets de l'aggrégation spatiale sur les indicateurs calculés : les aires de diffusion, les secteurs de recensement, les secteurs municipaux et trois grilles comparables à ces divisions.

Le calcul des différents indicateurs a été réalisé pour chaque zone pour les villes de Montréal et Laval et les comparaisons des distributions des indicateurs montrent que les effets zonaux et d'échelle du problème d'agrégation spatiale sont très présents et accentués lorsque la taille des zones est très variable ou lorsque les divisions sont très petites. Malgré les différences au niveau des distributions pour les différentes divisions du territoire, la classification et l'évaluation du niveau de multimodalité des divers groupes font ressortir une image similaire de la multimodalité à travers le territoire pour les différents systèmes de division. En effet, toutes les segmentations territoriales présentent une version de ces cinq types de zones distinctes, classées de la plus à la moins multimodale : zones centrales desservies par le métro, zones centrales non desservies par le métro, zones périphériques desservies par le train de banlieue, zones au centre de Laval et à l'est de Montréal avec des scores moyens ou bas pour tous les modes, et zones aux extrémités des îles de Montréal et de Laval avec les scores les plus bas pour la plupart des modes.

L'ajout de caractéristiques descriptives à l'analyse des groupes montre que les groupes de zones les moins multimodaux présentent des caractéristiques similaires. Les zones les moins multimodales sont souvent périphériques, moins densément peuplées, avec peu de vieux logements, des tailles de ménage moyennes plus élevées que les autres zones. Les résidents de ces zones ont tendance à quitter leur secteur de recensement pour aller travailler. En revanche, les zones plus multimodales, situées au centre, sont plus densément peuplées, ont moins de personnes par ménage et un plus grand nombre de vieux logements. Les habitants de ces zones se déplacent moins pour travailler, et la part du territoire urbanisée y est plus grande.

## ABSTRACT

Multimodality is a concept that can describe transport supply, demand and policies. Multimodal supply refers to a transport system offering several transport mode options while multimodal demand describes individuals using different modes of transport. And multimodal transport policies are measures aimed at increasing both types of multimodality.

Multimodality is becoming increasingly important in the transportation field for a variety of reasons, especially the focus on reducing dependence on the private automobile, in favor of public transit as well as active and shared modes. Increasing multimodality has many environmental and social benefits. It also improves the transport systems themselves, by increasing their resilience, safety and speed among other things.

To implement strategies aimed at increasing multimodality, it is essential to be able to define and quantify it in order to measure its evolution. Several indicators for measuring the multimodality of the transport demand have been established, tested and applied. However, few studies focus on measuring the multimodality of the transport supply, and those that do mainly take into account the availability and accessibility of the infrastructures, without considering the level of service of these different modes. The aim of this study is therefore to develop an indicator for measuring the multimodality of the transportation supply that takes into account the quality of service of the different modes, and that is adapted to the Montreal context.

This thesis develops a methodology for assessing the multimodality of the transport supply by zone, based on indicators established for each mode. For each mode, three elements are considered: the availability of the mode in the area, the accessibility of the mode within the area, and the quality of service of the mode in the area. The zones are then grouped according to these indicators, and the groups are compared to establish a ranking of the groups according to their multimodality.

To assess the effects of spatial aggregation on the calculated indicators, several land division systems are considered: dissemination areas, census tracts, municipal tracts and three grids comparable to these divisions.

The various indicators were calculated for each zone for the cities of Montreal and Laval, and comparisons of the indicator distributions show that the zonal and scale effects of the spatial aggregation problem are very present. These effects are accentuated when the size of the zones is

highly variable or when they are very small. Despite the differences in the distributions for the different divisions of the territory, the clustering and assessment of the level of multimodality of the various groups reveals a consistent picture of multimodality across the territory for the different division systems. In fact, all territorial segmentations present a version of these five distinct types of zones, ranked from most to least multimodal: central zones where the subway is available, central zones where the subway is not available, peripheral zones where the commuter train is available, zones in the center of Laval and east of Montreal with average or low scores for all modes, and zones at the extremities of the islands of Montreal and Laval with the lowest scores for most modes.

Adding descriptive characteristics to the group analysis shows that the least multimodal area groups have similar characteristics. The least multimodal areas are often peripheral, less densely populated, with few older dwellings and higher average household sizes than other areas. Residents of these areas tend to leave their census tracts for work. In contrast, the more multimodal, centrally located areas are more densely populated, have fewer people per household and a greater number of older dwellings. Inhabitants of these areas travel less to work, and the urban environment rate is higher.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIÈRES .....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XVII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XXVI
LISTE DES ANNEXES .....	XXVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Définition de la multimodalité .....	1
1.2 Importance de la multimodalité.....	2
1.3 Nécessité d'un indicateur de multimodalité .....	3
1.4 Objectifs .....	3
1.5 Territoire, période et modes étudiés .....	4
1.6 Plan du mémoire.....	5
CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES .....	6
2.1 Indicateurs de la multimodalité de la demande .....	6
2.1.1 Catégorisation.....	6
2.1.2 Mesure de la multimodalité de la demande.....	7
2.1.2.1 Formulation des indicateurs de multimodalité de la demande .....	7
2.1.2.2 Application des indicateurs de multimodalité de la demande .....	8
2.2 Indicateurs de multimodalité de l'offre .....	9

2.3	Indicateurs de multimodalité de l'offre et de la demande .....	10
2.4	Synthèse .....	11
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE .....		13
3.1	Description des bases de données .....	13
3.1.1	Automobile privée .....	13
3.1.2	Autopartage .....	15
3.1.3	Vélo privé .....	18
3.1.4	Vélopartage .....	22
3.1.5	Marche .....	23
3.1.6	Métro .....	26
3.1.7	Bus .....	28
3.1.8	Train de banlieue .....	30
3.1.9	Caractéristiques des secteurs de recensements .....	31
3.2	Formules de mesure de l'offre .....	32
3.2.1	Mesures de disponibilités .....	33
3.2.1.1	Automobile privée .....	33
3.2.1.2	Autopartage .....	34
3.2.1.3	Vélo privé .....	36
3.2.1.4	Vélopartage .....	36
3.2.1.5	Marche .....	38
3.2.1.6	Transports en commun .....	39
3.2.2	Mesures d'accessibilité .....	40
3.2.3	Mesure de qualité de service .....	41
3.2.3.1	Automobile privée et partagée .....	42

3.2.3.2	Vélo privé et partagé .....	43
3.2.3.3	Marche.....	44
3.2.3.4	Transport en commun.....	45
3.2.4	Combinaison des mesures de disponibilité, d'accessibilité et de qualité de service .....	54
3.3	Division du territoire .....	56
3.3.1	Problème d'agrégation spatiale .....	56
3.3.2	Sous-divisions du territoire .....	58
3.3.3	Méthodes de comparaison .....	59
3.4	Caractérisation de la multimodalité.....	60
CHAPITRE 4	RÉSULTATS .....	62
4.1	Distributions des indicateurs par système de division .....	62
4.1.1	Automobile privée.....	62
4.1.2	Autopartage .....	63
4.1.3	Vélo privé.....	65
4.1.4	Vélopartage .....	67
4.1.5	Marche.....	68
4.1.6	Métro .....	69
4.1.7	Train de banlieue .....	71
4.1.8	Autobus .....	72
4.1.9	Constats sur tous les modes.....	74
4.2	Analyse de la multimodalité des zones .....	75
4.2.1	Secteurs de recensement.....	77
4.2.1.1	Base de données non-traitées .....	77
4.2.1.2	Analyse en composantes principales .....	86

4.2.2	Secteurs municipaux .....	95
4.2.3	Les aires de diffusion .....	102
4.2.4	Grille équivalente aux secteurs de recensement.....	108
4.2.5	Grille équivalente aux secteurs municipaux.....	114
4.2.6	Grille équivalente aux aires de diffusion.....	119
4.2.7	Discussion des résultats.....	124
CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES RÉSULTATS SELON LE DÉCOUPAGE CHOISI .....		126
5.1	Effet zonal .....	126
5.1.1	Comparaison des distributions des indicateurs pour les aires de diffusion et la grille équivalente .....	126
5.1.2	Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de recensement et la grille équivalente .....	128
5.1.3	Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de municipaux et la grille équivalente .....	129
5.2	Effet d'échelle .....	131
5.2.1	Comparaison des distributions des indicateurs pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement .....	132
5.2.2	Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux.....	133
5.2.3	Évaluation de la sous-estimation, surestimation et bonne estimation des indicateurs	135
5.2.4	Comparaison des distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement .....	137
5.2.5	Comparaison des distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux.....	139

5.2.6	Conclusion sur le problème d'agrégation spatiale .....	140
CHAPITRE 6	CONCLUSION .....	142
6.1	Sommaire du contenu et des contributions .....	142
6.2	Limitations .....	144
6.3	Perspectives de recherche.....	146
RÉFÉRENCES.....		147
ANNEXE A	BLOCS DE STATIONS DU MÉTRO .....	153
ANNEXE B	CARTES DES INDICATEURS .....	155

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Extrait de la base de données des temps de parcours .....	14
Tableau 3.2 Extrait de la base de données concernant le service FLEX de Communauto .....	16
Tableau 3.3 Extrait de la base de données des réservations Communauto .....	17
Tableau 3.4 Extrait de la base de données décrivant l'état du réseau BIXI.....	22
Tableau 3.5 Extrait de la base de données des incidents du réseau du métro .....	27
Tableau 3.6 Extrait de la base de données concernant la ponctualité des autobus de la STL.....	29
Tableau 3.7 Extrait de la base de données concernant la ponctualité des autobus de la STM.....	30
Tableau 3.8 Extrait de la base de données relative à la ponctualité des passages des trains Exo .	30
Tableau 3.9 La correspondance entre les niveaux de confort et le score numérique .....	43
Tableau 3.10 Spécification des mesures devant être normalisées.....	55
Tableau 3.11 Caractéristiques des grilles équivalentes aux divisions.....	57
Tableau 3.12 Caractéristiques des grilles de sous-divisions .....	59
Tableau 4.1 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour l'automobile privée .....	62
Tableau 4.2 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour l'autopartage.....	64
Tableau 4.3 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le vélo privé.....	65
Tableau 4.4 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le vélopartage .....	67
Tableau 4.5 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour la marche .....	68
Tableau 4.6 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le métro.....	70
Tableau 4.7 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le train de banlieue .....	71
Tableau 4.8 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le bus .....	73
Tableau 4.9 Extrait de la base de données utilisée pour la classification des zones .....	76
Tableau 4.10 Corrélations entre les indicateurs pour les secteurs de recensement.....	77
Tableau 4.11 Nombre de secteurs de recensement par groupe .....	81

Tableau 4.12 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs de recensement obtenu avec les données non-traitées .....	83
Tableau 4.13 Nombre de modes par catégorie par groupe.....	83
Tableau 4.14 Caractéristiques descriptives principales des groupes, du moins au plus multimodal .....	86
Tableau 4.15 Coefficient des indicateurs pour les des composantes principales.....	87
Tableau 4.16 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante .....	87
Tableau 4.17 Coefficients de corrélations des composantes créées par l'analyse en composantes principales .....	87
Tableau 4.18 Nombre de secteurs de recensement par groupe .....	90
Tableau 4.19 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs de recensement obtenu avec les données non-traitées .....	91
Tableau 4.20 Nombre de modes par catégorie par groupe.....	92
Tableau 4.21 Caractéristiques descriptives principales des groupes, du moins au plus multimodal .....	94
Tableau 4.22 Corrélations entre les indicateurs des modes pour les secteurs municipaux .....	95
Tableau 4.23 Composition des nouvelles composantes pour les secteurs municipaux .....	96
Tableau 4.24 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante .....	96
Tableau 4.25 Nombre de secteurs de municipaux par groupe .....	100
Tableau 4.26 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs municipaux obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales .....	101
Tableau 4.27 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les secteurs municipaux .....	101
Tableau 4.28 Corrélations entre les indicateurs des modes pour les aires de diffusion.....	102
Tableau 4.29 Composition des nouvelles composantes pour les aires de diffusion .....	102
Tableau 4.30 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les aires de diffusion .....	103

Tableau 4.31 Nombre d'aires de diffusion par groupe.....	106
Tableau 4.32 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe d'aires de diffusion obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales .....	107
Tableau 4.33 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les secteurs municipaux .....	107
Tableau 4.34 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux secteurs de recensement.....	108
Tableau 4.35 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	109
Tableau 4.36 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	109
Tableau 4.37 Nombre de divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement dans chaque groupe.....	112
Tableau 4.38 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de divisions obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales .....	113
Tableau 4.39 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement. ....	113
Tableau 4.40 Comparaisons des valeurs médianes des indicateurs pour les groupes 1 et 4. ....	114
Tableau 4.41 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux secteurs municipaux .....	114
Tableau 4.42 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux .....	115
Tableau 4.43 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de la grille équivalente aux secteurs municipaux obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales	118
Tableau 4.44 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement. ....	119
Tableau 4.45 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux aires de diffusion .....	119

Tableau 4.46 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	120
Tableau 4.47 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	120
Tableau 4.48 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de la grille équivalente aux aires de diffusion obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales....	123
Tableau 4.49 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement. ....	124
Tableau 5.1 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et la grille équivalente ...	126
Tableau 5.2 Résultats des test statistiques pour les secteurs de recensement et la grille équivalente .....	128
Tableau 5.3 Résultats des test statistiques pour les secteurs de recensement et la grille équivalente .....	130
Tableau 5.4 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement .....	132
Tableau 5.5 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement .....	134
Tableau 5.6 Résultats des test statistiques pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement .....	137
Tableau 5.7 Résultats des test statistiques pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement .....	139
Tableau A.6.1 Blocs de stations de métros .....	153

## LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Réseau routier et les vitesses limites.....	14
Figure 3.2 Segments pour lesquels le temps de parcours existe .....	15
Figure 3.3 Couverture spatiale du service FLEX de Communauto .....	16
Figure 3.4 Emplacement des stations Communauto .....	18
Figure 3.5 Réseau cyclable de la ville de Montréal .....	19
Figure 3.6 Réseau cyclable de la ville de Laval .....	20
Figure 3.7 Réseau cyclable OSM Can-BICS pour le Canada .....	21
Figure 3.8 Réseau cyclable OSM Can-BICS pour Laval et Montréal .....	22
Figure 3.9 Emplacement des stations BIXI.....	23
Figure 3.10 Infrastructures piétonnières de Montréal et Laval .....	24
Figure 3.11 Utilisation du sol à Montréal et Laval .....	25
Figure 3.12 Intersections à Montréal et Laval.....	25
Figure 3.13 Nombre de logements par aire de diffusion à Montréal et Laval .....	26
Figure 3.14 Lignes et stations du métro .....	28
Figure 3.15 Lignes d'autobus de la STM et de la STL .....	29
Figure 3.16 Lignes de train Exo et les arrêts.....	31
Figure 3.17 Variation de la disponibilité temporelle en fonction de la fiabilité pour le métro .....	48
Figure 3.18 Variation de la non-punctualité en fonction de l'intervalle moyen pour les stations de bus .....	51
Figure 3.19 Variation de la multiplication en fonction de la moyenne .....	52
Figure 3.20 Variation de la moyenne en fonction du temps d'attente .....	53
Figure 3.21 Variation de la moyenne en fonction du temps d'attente .....	53

Figure 3.22 Variation de la ponctualité en fonction de l'intervalle moyen .....	54
Figure 3.23 Division du territoire selon les aires de diffusion .....	57
Figure 3.24 Division du territoire selon la grille équivalente aux aires de diffusion .....	57
Figure 3.25 Division du territoire selon les secteurs du recensement .....	58
Figure 3.26 Division du territoire selon la grille équivalente aux secteurs du recensement .....	58
Figure 3.27 Division du territoire selon les secteurs municipaux .....	58
Figure 3.28 Division du territoire selon la grille équivalente aux secteurs municipaux .....	58
Figure 4.1 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour l'automobile privée .....	63
Figure 4.2 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour l'autopartage.....	64
Figure 4.3 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le vélo privé.....	66
Figure 4.4 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le vélopartage .....	67
Figure 4.5 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour la marche .....	69
Figure 4.6 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le métro .....	70
Figure 4.7 Diagramme en boîte de l'indicateur global pour le train de banlieue.....	72
Figure 4.8 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le bus .....	73
Figure 4.9 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement .....	78
Figure 4.10 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement coupé pour créer 3 groupes .....	78
Figure 4.11 Distribution des indicateurs de modes pour les 3 groupes de secteurs de recensement .....	79
Figure 4.12 Distribution géographique des groupes de secteurs de recensement pour 3 groupes	79
Figure 4.13 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes pour les secteurs de recensement.....	80
Figure 4.14 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes.....	80

Figure 4.15 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement coupé pour créer 6 groupes .....	80
Figure 4.16 Distribution géographique des groupes de secteurs de recensement pour 6 groupes	81
Figure 4.17 Distribution des indicateurs pour les différents groupes .....	82
Figure 4.18 Distribution des indicateurs descriptifs pour les différents groupes.....	85
Figure 4.19 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	88
Figure 4.20 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	88
Figure 4.21 Dendrogramme obtenu de la classification des variables de l'analyse en composantes principales .....	89
Figure 4.22 Distribution des indicateurs pour les différents groupes .....	89
Figure 4.23 Distribution des groupes de secteurs de recensement classifié selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	90
Figure 4.24 Distribution des indicateurs descriptifs pour les différents groupes.....	93
Figure 4.25 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	97
Figure 4.26 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	97
Figure 4.27 Dendrogramme obtenu de la classification des secteurs municipaux selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	98
Figure 4.28 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de secteurs municipaux .....	99
Figure 4.29 Distribution des groupes de secteurs municipaux classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	100
Figure 4.30 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	104
Figure 4.31 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes.....	104
Figure 4.32 Dendrogramme obtenu de la classification des aires de diffusion selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	104
Figure 4.33 Distribution des indicateurs pour les différents groupes d'aires de diffusion .....	105

Figure 4.34 Distribution des groupes d'aires de diffusion classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	106
Figure 4.35 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	110
Figure 4.36 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes.....	110
Figure 4.37 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	110
Figure 4.38 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement. ....	111
Figure 4.39 Distribution des groupes de divisions classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales.....	112
Figure 4.40 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	116
Figure 4.41 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes.....	116
Figure 4.42 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	116
Figure 4.43 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux .....	117
Figure 4.44 Distribution des groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	118
Figure 4.45 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes.....	121
Figure 4.46 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes.....	121
Figure 4.47 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	121
Figure 4.48 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion.....	122
Figure 4.49 Distribution des groupes de divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales .....	123
Figure 5.1 Graphiques q-q des distributions pour les aires de diffusion et la grille équivalente	127

Figure 5.2 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les aires de diffusion et la grille équivalente .....	127
Figure 5.3 Graphiques q-q des distributions pour les secteurs de recensement et la grille équivalente .....	129
Figure 5.4 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et la grille équivalente .....	129
Figure 5.5 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs municipaux et la grille équivalente .....	130
Figure 5.6 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de municipaux et la grille équivalente .....	131
Figure 5.7 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés les aires de diffusion et les secteurs de recensement .....	132
Figure 5.8 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement .....	133
Figure 5.9 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux .....	134
Figure 5.10 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux .....	135
Figure 5.11 Comparaison des indicateurs des aires de diffusion et des secteurs municipaux (SM) et de recensement (SR) auxquels elles appartiennent .....	136
Figure 5.12 Graphes q-q pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement .....	138
Figure 5.13 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement .....	138
Figure 5.14 Graphes q-q pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux .....	139

Figure 5.15 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux .....	140
Figure Annexe A.6.1 Carte du réseau du métro montrant la numérotation des stations.....	154
Figure B.1 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les aires de diffusion .....	180
Figure B.2 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	180
Figure B.3 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les secteurs de recensement .....	181
Figure B.4 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	181
Figure B.5 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les secteurs municipaux .....	181
Figure B.6 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux.....	181
Figure B.7 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les aires de diffusion .....	182
Figure B.8 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	182
Figure B.9 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les secteurs de recensement .....	183
Figure B.10 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	183
Figure B.11 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les secteurs municipaux.....	184
Figure B.12 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour l'automobile partagée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux .....	184

Figure B.13 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les aires de diffusion.....	185
Figure B.14 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	185
Figure B.15 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les secteurs de recensement .....	186
Figure B.16 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	186
Figure B.17 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les secteurs municipaux .....	187
Figure B.18 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux.....	187
Figure B.19 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les aires de diffusion.....	188
Figure B.20 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	188
Figure B.21 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les secteurs de recensement .....	189
Figure B.22 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	189
Figure B.23 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les secteurs municipaux .....	190
Figure B.24 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le vélo partagé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux.....	190
Figure B.25 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les aires de diffusion .....	191

Figure B.26 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion.....	191
Figure B.27 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les secteurs de recensement .....	192
Figure B.28 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	192
Figure B.29 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les secteurs municipaux .....	193
Figure B.30 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux .....	193
Figure B.31 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les aires de diffusion .....	194
Figure B.32 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion.....	194
Figure B.33 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les secteurs de recensement .....	195
Figure B.34 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	195
Figure B.35 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les secteurs municipaux .....	196
Figure B.36 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux .....	196
Figure B.37 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les aires de diffusion .....	197
Figure B.38 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion .....	197

Figure B.39 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les secteurs de recensement .....	198
Figure B.40 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement .....	198
Figure B.41 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les secteurs municipaux .....	199
Figure B.42 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux.....	199
Figure B.43 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les aires de diffusion .....	200
Figure B.44 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion.....	200
Figure B.45 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les secteurs de recensement .....	201
Figure B.46 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.....	201
Figure B.47 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les secteurs municipaux .....	202
Figure B.48 Carte montrant la distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux.....	202

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

GAD	Grille équivalente aux aires de diffusion
GSM	Grille équivalente aux secteurs municipaux
GSR	Grille équivalente aux secteurs de recensement
GTFS	General Transit Feed Specification
OSM	Open Street Map
STL	Société de transport de Laval
STM	Société de transport de Montréal
TCQSM	Transit Capacity and Quality of Service Manual

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE A Blocs de stations du métro .....	153
ANNEXE B Cartes des indicateurs.....	155

## **CHAPITRE 1 INTRODUCTION**

La recherche sur le transport a souvent été très sectorielle, s'intéressant à un mode à la fois, mais pendant les vingt dernières années une vision plus globale s'est développée et plusieurs modes ont commencé à être incorporés dans les études (Nobis, 2007). Aujourd'hui l'évaluation des transports multimodaux est un des sujets les plus importants dans la recherche sur les transports (Lemonde, Arsenio, & Henriques, 2021b). En effet, la multimodalité représente un des quatre axes de la recherche sur la variabilité des comportements de déplacements (Lemonde, Arsenio, & Henriques, 2021a).

### **1.1 Définition de la multimodalité**

La définition la plus utilisée et la plus générale de la multimodalité est l'utilisation de différents modes de transport de manière flexible (Groth & Kuhnimhof, 2021). C'est un concept qui peut décrire l'offre, la demande et les politiques de transport (Groth & Kuhnimhof, 2021). Une offre de transport multimodale décrit un système de transport qui fournit plusieurs options de modes viables à l'utilisateur. Par « offre de transport » on désigne l'ensemble des ressources de mobilité en termes d'infrastructures et de services (Groth & Kuhnimhof, 2021). En termes de demande, la multimodalité peut être définie au niveau de l'individu ou du déplacement. (Deschaintres, Morency, & Trepanier, 2021). Il est important de noter que la multimodalité dans un seul déplacement est désignée par le terme « intermodalité » (Nobis, 2007). Un individu est dit multimodal s'il utilise plus qu'un mode de transport pendant une période déterminée (Buehler & Hamre, 2015; Nobis, 2007). La multimodalité peut aussi être une politique de transport, visant à l'augmenter dans le comportement des individus, notamment en visant une meilleure intégration des modes (Groth & Kuhnimhof, 2021). La conception multimodale, qui est le but de ces politiques, vise à créer un système de transport diversifié, entraînant des comportements multimodaux, qui s'oppose à la conception des réseaux classiques, axée sur l'automobile au détriment des autres modes (Litman, 2001). La conception multimodale vise plutôt la conception d'un système centré sur l'individu, qui donne une grande importance à l'accessibilité pour tous (Ren, Fusco, Lownes, & Zhu, 2022). Comme le concept de multimodalité reconnaît l'importance de tous les modes dans le système de transport, il a souvent été considéré comme un point commun pour différentes parties prenantes, et est donc important dans les débats de mobilité (Groth & Kuhnimhof, 2021).

La multimodalité est un objectif poursuivi à différents niveaux politiques. Notamment l'Union Européenne a désigné 2018 comme « l'année de la multimodalité » dans le but de réduire les émissions de gaz à effets de serre dans le contexte de l'Accord de Paris (Groth & Kuhnimhof, 2021). En effet, la multimodalité est proposée comme un substitut plus écologiquement durable à l'utilisation de l'automobile privée depuis les années quatre-vingt-dix puisque les modes alternatifs sont plus économes en ressources que la voiture, surtout quand cette dernière utilise l'énergie fossile (Groth & Kuhnimhof, 2021). Cette solution est de plus en plus présente dans la discussion relative à la durabilité du secteur des transports dans le contexte de la sensibilisation au changement climatique (An, Heinen, & Watling, 2021).

## **1.2 Importance de la multimodalité**

Les bénéfices de la multimodalité ont souvent été confirmés dans la littérature qui suggère que son augmentation est une stratégie effective pour réduire les émissions de GES associées au secteur du transport (An, Heinen, & Watling, 2023). D'autres chercheurs tiennent à préciser que même si la multimodalité est souvent vendue comme une solution écologique, elle ne l'est pas toujours. En effet, les bénéfices de la multimodalité existent seulement si les déplacements multimodaux remplacent des déplacements qui étaient centrés sur l'automobile privée (Groth & Kuhnimhof, 2021). Par exemple un cycliste qui se met à utiliser la voiture pour certain déplacement devient plus multimodal mais ses comportements deviennent moins durables. Le but de l'augmentation de la multimodalité est d'augmenter l'utilisation des transports en commun, des modes actifs et des modes partagés afin de réduire l'utilisation de l'automobile privée (Tsirimpa, Polydoropoulou, Pagoni, & Tsouros, 2019). Cette tâche est rendue difficile par une culture d'utilisation de la voiture privée très ancrée (Mehdizadeh, Zavareh, & Nordfjaern, 2019). Pourtant, il a été montré que l'amélioration de l'offre de transport du transport en commun, du vélopartage et de l'autopartage en station, en termes de fréquence de passages, de nombre de points d'ancrage des stations de vélopartage et de nombre de véhicules dans les stations d'autopartage respectivement, entraîne une hausse du niveau de multimodalité. Il peut être déduit qu'il est possible d'améliorer la durabilité des comportements des utilisateurs en améliorant la multimodalité de l'offre de transport (Deschaintres et al., 2021).

Les bénéfices apportés par un système de transport plus multimodal ne se limitent pas à la diminution des émissions de gaz à effet de serre. En effet, augmenter le taux de multimodalité

permet l'émergence d'une communauté multimodale qui utilise moins la voiture et s'appuie sur les modes alternatifs, engendrant de nombreux bénéfices économiques et sociaux comme une diminution des taux de victimes d'accidents routiers, une augmentation du taux de personnes actives et en bonne santé et une réduction de la consommation d'énergie par habitant (Litman, 2001).

Le système de transport est lui-même amélioré par la multimodalité qui permet d'augmenter sa résilience (Amoaning-Yankson & Amekudzi-Kennedy, 2017), sa praticité, sa sécurité, sa vitesse et sa fiabilité, tout en réduisant ses coûts (Lemonde et al., 2021a).

### **1.3 Nécessité d'un indicateur de multimodalité**

Ayant établi l'importance d'augmenter la multimodalité dans le système de transport, la nécessité d'un indicateur qui puisse mesurer le niveau de multimodalité d'un système devient évidente. En effet, développer une mesure robuste de la multimodalité est essentielle non-seulement dans les étapes de planification et prise de décision, mais aussi dans les étapes d'évaluation après la réalisation de projets (Lemonde et al., 2021a). Un des défis principaux rencontrés par les planificateurs de transport lors de l'évaluation des projets est donc l'absence des mesures de performance multimodales cohérentes et comparables dans le temps et à travers les régions (Khedri, Malarkey, & MacKenzie, 2022).

Les indicateurs mesurés au niveau individuel ou régional permettent d'établir une image globale des préférences modales en tenant compte de l'offre et de l'accessibilité de cette offre. Ils permettent aussi de repérer les vulnérabilités dans le système (Lemonde et al., 2021a). Malgré le fait que l'importance du développement de systèmes de transports multimodaux est de plus en plus apparente, une méthodologie formalisée de mesure de la multimodalité des systèmes dans un cadre exhaustif n'a toujours pas été établie (Ren et al., 2022). C'est dans ce contexte que s'inscrit ce projet, qui vise à formuler un indicateur qui permet de mesurer la multimodalité de l'offre de transport.

### **1.4 Objectifs**

L'objectif principal de ce projet est la formulation d'un indicateur composite qui permet de mesurer la multimodalité de l'offre de transport dans le contexte montréalais. Tel que discuté dans l'état des connaissances présenté au prochain chapitre, des indicateurs de diversité de l'offre existent

mais ils ne prennent pas en compte tous les modes existant dans le territoire étudié et n'intègrent pas la qualité de service des modes.

Le premier objectif est donc d'établir un indicateur qui permette de mesurer l'offre de chaque mode de transport dans une zone donnée. Pour cet indicateur, trois éléments sont considérés : la disponibilité du mode dans la zone, l'accessibilité au mode à travers la zone et la qualité de service du mode dans la zone. Les définitions et méthodes de calculs de ces éléments seront expliqués ultérieurement. Le deuxième objectif est la combinaison de ces indicateurs pour pouvoir caractériser la multimodalité d'une zone. Et le troisième est d'évaluer la multimodalité des zones considérées dans ce projet.

## **1.5 Territoire, période et modes étudiés**

Le territoire étudié est composé des villes de Montréal et Laval. Initialement, le projet portait sur l'ensemble de la région montréalaise couverte par l'enquête Origine-Destination, mais en raison du manque de données fiables pour les modes actifs, la zone d'étude a été restreinte aux territoires de Montréal et de Laval.

La période d'étude choisie est celle de l'automne 2018, s'étendant de septembre à décembre. Cette période permet d'assurer une comparabilité des résultats tout en les rendant exploitables dans le cadre de l'enquête Origine-Destination montréalaise, réalisée durant la même période. Pour cette même raison, seuls les jours de semaine sont considérés pour toutes les analyses. Cela facilitera l'intégration des données et résultats dans des travaux futurs.

Les modes considérés dans le cadre de ce projet sont ceux disponibles à Montréal et pour lesquels les données sont disponibles : l'automobile privée, l'autopartage, le vélo privé, le vélopartage, la mèche, le métro, le bus et le train de banlieue.

Un autre élément important à prendre en compte est le choix des modes. Fu, van Lierop, & Ettema (2023) présentent les catégories de modes suivantes en se basant sur la classification des modes de plusieurs études de multimodalité: le transport actif, le transport en commun intra-ville, le transport en commun interurbain, l'automobile et autres. En 2018, les modes de transport terrestres disponibles à Montréal peuvent être classifiés selon ces catégories de la façon suivante :

- Le transport actif : Marche, Vélo (privé et partagé)
- Le transport en commun intra-ville : Bus, Métro

- Le transport en commun interurbain : Train de banlieue
- L'automobile : Privée, Partagée
- Autres : Taxi

Ces modes sont tous considérés sauf le taxi pour lequel les données nécessaires ne sont pas disponibles.

## **1.6 Plan du mémoire**

Ce mémoire est structuré en cinq grandes parties : l'état des connaissances, la méthodologie, les résultats, l'analyse de la sensibilité selon les découpages choisis et les conclusions et limites. L'état de connaissances examine divers indicateurs de multimodalité proposés dans la littérature. La méthodologie se divise en quatre sections : une description des bases de données utilisées, les définitions et formules pour mesurer l'offre de chaque mode, la définition des zones considérées ainsi que les méthodes de comparaison des résultats et la mesure globale de la multimodalité. Les résultats comportent deux sections : la distribution des indicateurs par mode et par système zonal, et l'analyse de la multimodalité des zones du territoire étudié. L'analyse de la sensibilité selon les découpages choisis présente une comparaison des distributions des indicateurs et l'étude de l'effet du problème d'agrégation spatiale.

## CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les mesures de multimodalité dans la littérature sont le plus souvent quantitatives, mais des mesures qualitatives existent aussi (Groth & Kuhnimhof, 2021). Cet état des connaissances se limitera aux mesures quantitatives, comme le but de ce projet est de développer une mesure quantitative de la multimodalité de l'offre de transport. De plus, bien que le projet se concentre principalement sur la multimodalité de l'offre de transport, cette revue inclut toutes les mesures de multimodalité identifiées, qu'elles concernent l'offre ou la demande, mais ne s'intéresse pas aux mesures d'intermodalité et connectivité au sein des systèmes.

An et al. (2023) distingue trois façons de mesurer la multimodalité qui ont été utilisées dans la littérature : (1) des caractérisations prédéfinies où les individus sont multimodaux ou unimodaux selon leurs modes de déplacement principaux, comme vu dans les travaux de Nobis (2007), (2) une classification basée sur les données en utilisant des méthodes non-supervisées de classification, comme vu dans les travaux de Heinen (2018) et (3) des indicateurs continus comme vus dans les travaux de Diana & Pirra (2016).

Cet état des connaissances sera divisé en quatre parties principales : les mesures de la multimodalité de la demande, les mesures de multimodalité de l'offre, les mesures qui prennent ces deux éléments en compte, et une synthèse montrant les lacunes dans la littérature.

### 2.1 Indicateurs de la multimodalité de la demande

En termes de demande, le concept de multimodalité décrit un individu utilisant plus d'un mode de transport sur une période déterminée (Groth & Kuhnimhof, 2021). L'accent est donc mis sur les comportements des individus.

Deux moyens d'évaluer la multimodalité de la demande se présentent dans la littérature, le premier consiste en une catégorisation des individus selon les modes les plus utilisés, le deuxième est une évaluation de la diversité de l'intensité de l'utilisation des différents modes.

#### 2.1.1 Catégorisation

Nobis (2007) publie une des premières études sur la multimodalité en tant que concept global. Les études précédentes se concentraient sur les interactions entre deux modes. Nobis (2007) évalue la proportion d'individus multimodaux. L'auteur classe les individus en huit groupes : trois groupes unimodaux et quatre groupes de différents degrés de multimodalité. Klinger (2017) utilise huit

catégories pour comparer la multimodalité d'individus avant et après un déménagement. Les catégories sont les suivantes : l'utilisation unimodale de la voiture / du transport en commun / du vélo / de la marche, l'utilisation bimodale de la voiture et du transport en commun / voiture et modes actifs / transport en commun et modes actifs et l'utilisation trimodale de la voiture, des modes actifs et du transport en commun.

## **2.1.2 Mesure de la multimodalité de la demande**

On peut diviser les études où la multimodalité de la demande est abordée en deux groupes : les études qui proposent la formulation d'un indicateur et les études qui appliquent ces indicateurs afin de mesurer la multimodalité dans différents contextes.

### **2.1.2.1 Formulation des indicateurs de multimodalité de la demande**

Susilo & Axhausen (2014) mesurent la diversité des choix activité-mode, lieux-mode, activité-lieux et activité-temps de départ des individus en utilisant l'indice de Herfindahl. La mesure utilisée est la part de chaque combinaison pour chaque individu sur les six semaines d'études. Le but est de déterminer les facteurs qui affectent la répétitivité de ces combinaisons. L'indice de Herfindahl a été choisi car il donne plus d'importance aux éléments qui ont une part totale plus grande, ce qui est adéquat dans cette étude qui vise à mettre en avant les répétitions de combinaisons. Diana & Pirra (2016) évaluent plusieurs indices pris des domaines de l'économie, de l'écologie et de la théorie de l'information dans le but de trouver des indices qui peuvent être adaptés pour mesurer la multimodalité des comportements des individus. Ils cherchent des indicateurs qui ont les cinq propriétés suivantes : un principe de transfert faible (quand l'utilisation d'un mode peu utilisé augmente au profit du mode le plus utilisé, l'indice devrait augmenter), un principe de transfert fort (une variation d'intensité entre deux modes prédominants affecte l'indice moins qu'une variation entre un mode très utilisé et un autre moins utilisé, même si la variation est la même), une indépendance par rapport à l'échelle et à la taille de la population (avec les modes représentant la population dans ce cas) et enfin, la décomposabilité (le classement de multimodalité d'un groupe d'individus doit correspondre au classement de multimodalité d'un des sous-groupes qui utilisent tous les modes). Les auteurs trouvent alors quatre indicateurs qu'ils jugent adéquats pour mesurer la multimodalité : l'indicateur de Dalton, l'indicateur de Herfindahl–Hirschman et des indicateurs de multimodalité basés sur l'entropie de Shannon nommés (OM\_PI et OM\_MI).

Fu, van Lierop, & Ettema (2023) proposent un indicateur permettant de prendre en compte la variation dans l'utilisation des différents modes de transport selon les catégories principales (mobilité active, transports en commun, voiture) et leurs sous-catégories (comme le bus ou le train). Cet indicateur, basé sur une mesure d'entropie, évalue l'équilibre de l'utilisation des catégories principales de modes de transport ainsi que celui des modes spécifiques au sein de chaque groupe. Il attribue des scores plus élevés à une utilisation équilibrée des modes de transport. Une application de cet indicateur a été réalisée à partir des données des villes de Utrecht et Rotterdam.

### **2.1.2.2 Application des indicateurs de multimodalité de la demande**

Heinen & Chatterjee (2015) calculent quatre indicateurs pour chaque individu dans le but de déterminer les caractéristiques des individus multimodaux : le nombre total de modes utilisés, le pourcentage d'utilisation de chaque mode en termes d'étapes de déplacement, l'écart entre la part des modes primaires et secondaires utilisés et enfin l'indicateur de Herfindahl–Hirschman.

An et al. (2021) utilisent OM\_PI comme proposé par Diana & Pirra (2016) pour mesurer la multimodalité des individus et sa variation sur 16 ans en utilisant l'enquête nationale sur les déplacements en Angleterre de 2001 à 2017. Ils déterminent l'effet de l'âge, de la période et de la cohorte sur cette variation. Cet indicateur a été choisi car il est adapté au cas où les individus étudiés n'ont pas tous un accès égal à tous les modes.

Lemonde et al. (2021a) mesurent la multimodalité au niveau des individus et des zones. Pour les individus, le nombre d'utilisations de chaque mode par mois est calculée, ensuite la distribution des individus selon le nombre de validations de cartes à puce est analysée. Au niveau des zones, les indicateurs de Gini et Herfindahl–Hirschman modifié sont utilisés. Ces deux indicateurs ont été sélectionnés pour leur capacité de mesure de l'intensité d'utilisation et leur simplicité. Les auteurs soulignent que l'utilisation des indicateurs Herfindahl–Hirschman, OM\_Pi et OM\_MI comme proposé par Diana & Pirra (2016) est recommandée pour mesurer la multimodalité dans le but de comparer différents groupes socio-économiques. Mais dans le cas où des modes ne sont pas tous utilisés l'indicateur de Dalton modifié comme proposé par Diana & Pirra (2016) serait un meilleur choix.

Lemonde et al. (2021b) étudient la multimodalité de la demande de transport dans la ville de Lisbon. Les auteurs considèrent trois modes : le vélopartage, le métro et les bus et tramway (ces deux derniers sont considérés comme un seul mode). La multimodalité des zones d'analyse de

trafic est mesurée à l'aide des indices de Gini et Herfindahl-Hirschman modifié. Le mesure d'intensité d'utilisation de chaque mode est le nombre d'utilisations du mode (validation d'entrée et sortie). Pour les transports en commun, les données de carte à puce sont utilisées et comme pour le bus il n'y a pas de validation à la sortie, des modèles sont nécessaires pour déduire les sorties. L'élément particulier dans cette étude est l'utilisation des données de contexte (comme la météo et les événements publics) pour ajuster la demande et les choix modaux, avec des facteurs de corrections. Les indices calculés par zones sont ensuite comparés au nombre de modes disponibles dans chaque zone d'analyse de trafic (Traffic Analysis Zone, abrégé TAZ).

Deschaintres et al. (2021) utilisent l'indicateur de Dalton modifié comme présenté par Diana & Pirra (2016) afin de mesurer la multimodalité de la demande avant et après une amélioration de l'offre de transport. Le choix de cet indicateur est justifié par le fait qu'il est sensible aux différences d'intensité d'utilisation de modes et qu'il permet de prendre en compte les modes les moins utilisés, ce qui est utile quand un des modes est prédominant, qui est le cas de la voiture privée à Montréal. L'indicateur est appliqué à des typologies de personnes, où l'intensité d'utilisation d'un mode est le temps du déplacement réalisé avec ce mode. Les données utilisées pour mesurer la multimodalité des individus dans cette étude sont les enquêtes Origine-Destination montréalaises des années 2013 et 2018.

An et al. (2023) utilisent quatre mesures afin d'évaluer la multimodalité des individus : (1) le nombre de modes utilisés, (2) l'écart entre la part des modes primaires et secondaires utilisés, (3) l'indicateur de Herfindahl-Hirschman, (4) l'indicateur OM\_PI comme proposé par Diana & Pirra (2016). Le nombre de modes utilisés permet d'avoir un aperçu de la multimodalité d'un individu. L'écart entre les parts des modes primaires et secondaires permet de caractériser la dépendance d'un individu sur un certain mode. Et les indicateurs continus permettent de prendre en compte la diversité et l'intensité d'utilisation.

## **2.2 Indicateurs de multimodalité de l'offre**

Litman (2001) revoit des indicateurs de performance liés à chaque mode, et deux indicateurs agrégés. Pour chaque mode, il présente des indicateurs de performance, qui pourraient être intégrés dans un indicateur de multimodalité. Un des indicateurs proposés pour mesurer la multimodalité du système est une mesure d'accessibilité : combien de points d'intérêts peuvent être atteints en un certain temps, avec combien de modes. L'autre indicateur est le « Transportation for Everyone

Rating » qui présente dix critères concernant les modes disponibles, le service fourni et leur connectivité qui sont notés sur 10, pour enfin donner une note sur 100 à une zone donnée. Un score supérieur à 70, indique une zone multimodale, qui ne dépend pas de l'automobile.

Une offre de transport multimodale se caractérise par la diversité des options de modes disponibles (Groth & Kuhnimhof, 2021). C'est dans ce sens que le Complete Street Score est une mesure de la multimodalité de l'offre. Ce score repose sur le principe qu'une route « complète » doit desservir de manière adéquate tous ses utilisateurs, qu'ils soient conducteurs, piétons, cyclistes ou usagers des transports en commun, que ce soit pour leurs déplacements ou pour utiliser l'espace public. Afin de déterminer le score, un auditeur répond à un questionnaire qui inclut des questions qui évaluent le service de la route par rapport à chaque groupe d'utilisateur, et compare ce score au score désiré qui change d'une communauté à l'autre (Kingsbury, Lowry, & Dixon, 2011). Ce concept est très utilisé dans les politiques de transport. En effet, plus de 1700 politiques de « Complete Streets » ont été adoptées aux États-Unis (Smart Growth, 2024).

En se basant sur les similarités entre le système écologique et le système de transport évoquées dans la revue de littérature de Amoaning-Yankson & Amekudzi-Kennedy (2017), Rahimi-Golkhandan, Garvin, & Brown (2019) adaptent le concept de diversité écologique au système de transport. Ils proposent donc deux mesures de la diversité de l'infrastructure: la richesse et la régularité fonctionnelles. La richesse décrit la quantité totale de modes de transports disponibles dans une zone donnée, tandis que la régularité décrit la distribution de ces modes à travers la zone en termes d'accessibilité. Ces deux mesures combinées, avec la méthode de l'analyse par enveloppement des données (abrégé DEA), permettent de déterminer la diversité des infrastructures dans un système de transport. Cette mesure prend donc en compte la disponibilité des différents modes et l'accessibilité à ces modes à travers la zone considérée.

### **2.3 Indicateurs de multimodalité de l'offre et de la demande**

Deux études proposant un indicateur de multimodalité prenant en compte à la fois l'offre et la demande ont été identifiées.

Lee & Miller (2017) ont développés un indicateur qui a pour but de mesurer la multimodalité de l'offre et de la demande des projets de transport. Cet indicateur s'appuie sur l'indice de Simpson, utilisé pour évaluer la diversité d'un environnement. L'indicateur développé par les auteurs, qui est appelé Degrés de Multimodalité (Degree of Multimodality, DM), adapte les idées formulées par

Simpson (1949), en considérant non-seulement le nombre de modes pris en compte par le projet mais aussi leur utilisation. Cet indicateur prend donc en compte, l'offre et la demande. Afin de mesurer la multimodalité de l'offre, les coûts marginaux ou totaux (qui peuvent inclure ou non les coûts d'entretien selon les données disponibles) consacrés à chaque mode dans le projet sont comparés au coût total du projet. Pour la demande, ce sont les parts modales qui sont considérées. Celles-ci peuvent provenir de plusieurs sources de données. Le poids de chacun des deux éléments est déterminé grâce à la méthode d'analyse en composantes principales (PCA). Les auteurs l'ont appliqué sur six projets (trois autoroutes et trois projets de centres multimodaux) et ont mesuré la multimodalité avant et après la réalisation des projets. Les sources de données utilisées dans ce cas pour les parts modales étaient des comptages, une enquête sur les préférences déclarées, le recensement américain (American Community Survey) qui communique des informations sur les modes utilisés pour les déplacements maison-travail et les prévisions des volumes de circulation ou des déplacements par mode.

Ren et al. (2022) proposent une cadre d'étude qui permet de quantifier la diversité des systèmes de transports multimodaux basé sur l'entropie qui prend en compte l'infrastructure présente et les comportements de déplacement des usagers. Les auteurs mesurent séparément la multimodalité de l'offre et de la demande. Ils comparent ensuite la classification de différentes sous-régions en termes d'offre et de demande. Comme les valeurs ne sont pas obtenues de la même façon, elles ne sont pas directement comparables. La mesure de la diversité de l'offre reprend les concepts de richesse et régularité fonctionnelles proposés par Rahimi-Golkhandan et al. (2019) et les combine pour chaque mode considéré avec la méthode de pondération entropique (Entropy Weight Method, abrégé EWM), pour obtenir un indicateur qui représente la multimodalité de l'offre. La mesure de la multimodalité de la demande dans une zone se fait en mesurant la répartition de l'utilisation des différents modes de transport par les résidents d'une zone. Cela se fait en calculant l'entropie associée à la répartition d'utilisation des modes dans chaque zone. Le nombre de déplacements effectués par mode est utilisé comme mesure d'intensité de l'utilisation.

## 2.4 Synthèse

Cet état des connaissances concernant les mesures de multimodalité fait ressortir plusieurs constats. D'abord le nombre d'études consacrées à la mesure de la multimodalité en tant que diversité de l'offre et demande de transport reste limité. De plus, il semble y avoir un plus grand nombre

d'études qui s'intéressent au développement et à l'application d'indicateurs de multimodalité de la demande qu'à la multimodalité de l'offre de transport. Parmi les études concernant l'offre de transport, deux présentent des indicateurs quantitatifs et comparables pour tous les modes. Les indicateurs proposés dans la première mesurent la disponibilité et l'accessibilité des modes et la seconde examine les coûts marginaux associés à chaque mode. Si le but est la planification et l'explication de la multimodalité de la demande, comme présenté dans l'introduction, il est nécessaire de prendre en compte l'expérience des usagers et leur accès aux modes. Une seule étude répond à ces critères, mais elle présente certaines limites. Notamment, la qualité du service n'est pas prise en compte dans le cadre d'évaluation proposé, et les modes de transport partagés sont exclus. En effet, les modes de transport considérés dans cette étude se limitent à la marche, au bus, au métro, au train, au vélo et à l'automobile, sans inclure les modes partagés.

## **CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE**

Cette section est divisée en quatre parties : la description des bases de données utilisées, la méthode de mesure de l'offre de chaque mode, les divisions du territoire considérées et la méthode de caractérisation de la multimodalité.

### **3.1 Description des bases de données**

Cette section présente toutes les bases de données utilisées dans le cadre de ce projet et leur traitement, organisées par mode de transport. Les données couvrent les jours de semaine de l'automne 2018 et les villes de Montréal et Laval. Pour les bases de données indisponibles pour cette période, la période la plus proche ou la plus comparable a été sélectionnée.

#### **3.1.1 Automobile privée**

Les données requises pour l'analyse de l'offre liée à l'automobile privée portent sur le réseau routier. Les informations relatives au réseau routier sont fournies par la géobase « AQdirection » d'Adresses Québec (Adresses Québec, 2019). La dernière mise à jour de cette base de données remonte à novembre 2019, ce qui correspond très étroitement aux infrastructures pour la période visée. La géobase est une représentation filamentaire du réseau routier, qui représente chaque tronçon, incluant les différentes voies et directions. Les informations extraites de cette base de données pour utilisation dans ce projet sont la représentation géographique du réseau et les limites de vitesses sur les différents tronçons. Les données cartographiques représentant le réseau routier sur le territoire étudié et les limitations de vitesse sont montrées à Figure 3.1.

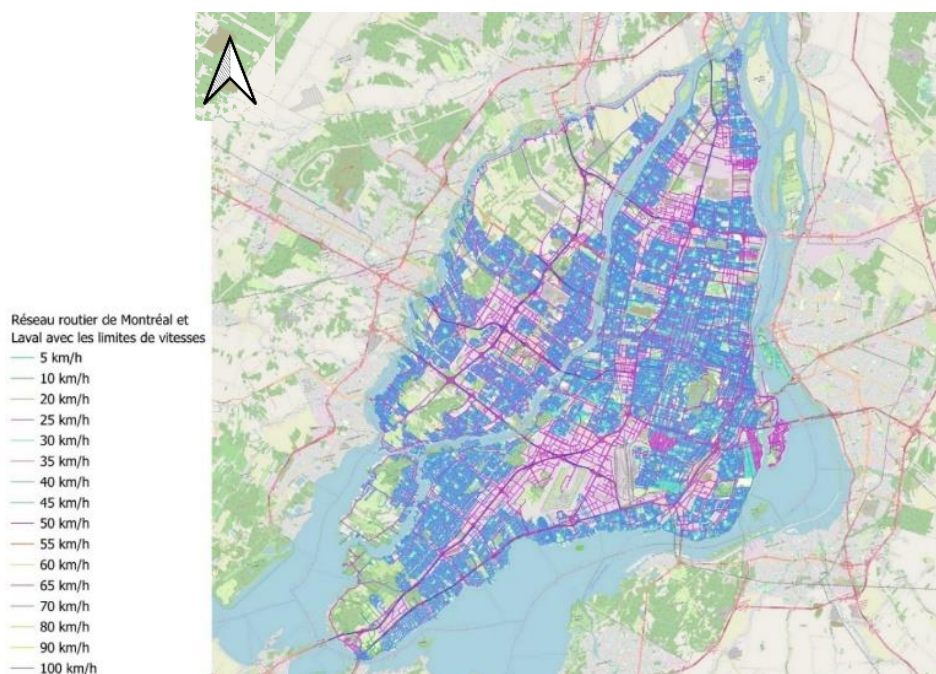


Figure 3.1 Réseau routier et les vitesses limites

Les données de temps de parcours utilisées couvrent la période du 3 au 13 septembre 2019 et sont celles des taxis, fournies par le registre des Taxis de la Ville de Montréal. Les données suivantes sont fournies pour chaque enregistrement : l'identifiant unique de l'enregistrement, l'identifiant du segment, l'identifiant du taxi, la distance en mètres, la durée en second, la vitesse en kilomètres par heure, l'heure et minute de l'enregistrement, ainsi que la date. Un extrait de cette base de données est présenté dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Extrait de la base de données des temps de parcours

id	way_id	Taxi	distance_m	duration_s	speed_kmh	hour	minute	date
977379742538	37612650	000000	42	10	30	0	0	03-9-19
1884182409745	45571059	00000000	116	156	50	0	0	03-9-19

Les valeurs de vitesse aberrantes sont identifiées comme étant inférieures à 1.5 fois l'écart interquartile au premier quartile ou supérieures à 1.5 fois l'écart interquartile au troisième quartile et sont supprimées. La vitesse moyenne par segment est calculée par heure pendant la période de pointe matinale (considérée comme étant de 6h à 9h), puis agrégée par jour, et enfin sur toute la

période étudiée. L'identifiant unique de chaque segment correspond aux identifiants des segments dans OpenStreetMap (OSM). Ces segments sont extraits d'OSM et sont décalés de quelques mètres par rapport au réseau d'Adresse Québec. Pour remédier à cela, une zone tampon est créée autour du réseau OSM et les valeurs de vitesse enregistrées sont attribuées aux tronçons de la base d'Adresse Québec situés dans cette zone tampon. Ces segments peuvent être vus à la Figure 3.2, avec les vitesses moyennes enregistrées.

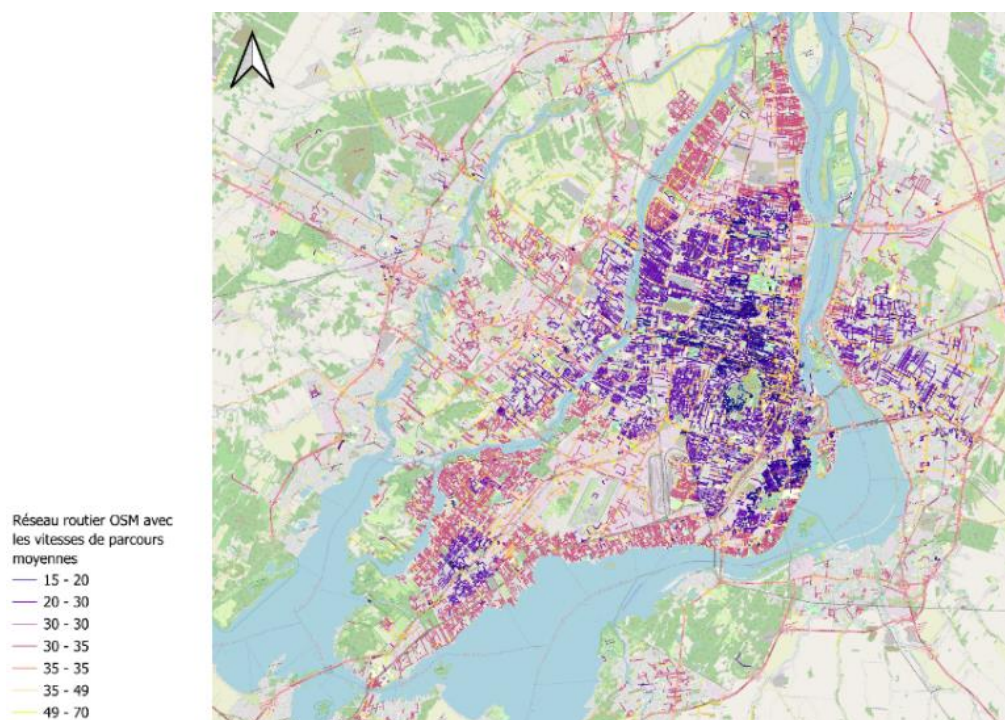


Figure 3.2 Segments pour lesquels le temps de parcours existe

### 3.1.2 Autopartage

Les services d'autopartage sont gérés par Communauto, qui offre ses services dans quatre provinces canadiennes et en France. À Montréal, Communauto offre deux types de services : le service FLEX et le service en station avec réservation. Le service FLEX permet aux utilisateurs d'utiliser des véhicules en libre-service pour effectuer leurs déplacements et de les laisser à leur destination (dans la zone de desserte) une fois leur trajet terminé. Grâce à l'application mobile, ils peuvent localiser les voitures disponibles à proximité. Le service en station de Communauto nécessite que les utilisateurs fassent une réservation à l'avance et retournent le véhicule là où il a été emprunté à la fin de la réservation. Les véhicules doivent donc être retournés à la station de

départ à la fin du trajet (Communauto Québec, 2024). Les bases de données liées à ces deux services ont été fournies par Communauto.

Pour le service en libre-service (FLEX), la base de données partagée donne la position des véhicules quand ils sont disponibles, aux cinq minutes, pour les mois de septembre, octobre, novembre et décembre 2018. Le Tableau 3.2 montre un extrait de cette base de données.

Tableau 3.2 Extrait de la base de données concernant le service FLEX de Communauto

name	timestamp	lat	lon	month
3747	01-09-18 0:00	46.8123927	-71.2204403	9
3014	01-09-18 0:00	46.810178	-71.222262	9
3748	01-09-18 0:00	46.8184042	-71.2193118	9

Les colonnes, de gauche à droite, présentent respectivement : l'identifiant unique du véhicule, l'horodatage de la position enregistrée, la latitude de la position, la longitude de la position et le mois de l'enregistrement de la position. Dans le but d'alléger la base de données, seuls les enregistrements faits au début de chaque heure (c'est-à-dire au moment précis où l'heure change) sont pris en compte.

De plus une géobase représentant l'aire couverte par ce service est fournie, et peut être vue à la Figure 3.3

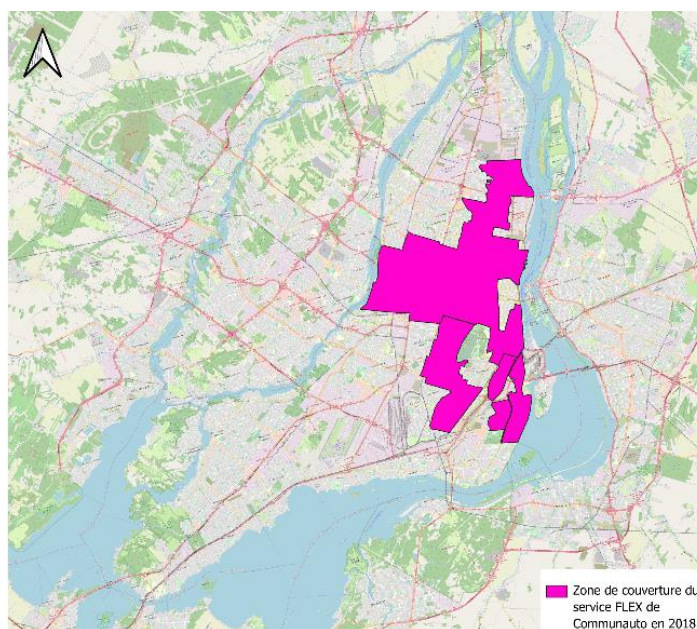


Figure 3.3 Couverture spatiale du service FLEX de Communauto

Pour le service en station, la base de données partagée décrit les réservations de véhicules et communique des informations sur l'abonné, la station, le véhicule et le déplacement, pour les mois de septembre, octobre, novembre et décembre 2018. Les attributs nécessaires pour les calculs dans le cadre de ce projet sont les suivants : la station associée à la réservation, le véhicule et les temps de début et de fin de la réservation. Un extrait de cette base de données est montré dans le Tableau 3.3 avec les colonnes de gauche à droite représentant : l'identifiant unique de la réservation, l'identifiant unique de la station, l'identifiant de la ville où la station est située, la longitude de la station, la latitude de la station, l'horodatage du début de l'emprunt et l'horodatage de la fin de l'emprunt.

Tableau 3.3 Extrait de la base de données des réservations Communauto

<b>res_id</b>	<b>st_id</b>	<b>st_ville_no</b>	<b>st_lon</b>	<b>st_lat</b>	<b>res_trip_start_datetime</b>	<b>res_trip_end_datetime</b>
21067557	376	59	- 73.593916	45.522101	28-09-18 10:00	28-09-18 10:45
21332313	473	59	- 73.646024	45.576556	28-09-18 8:00	28-09-18 8:15
21073190	636	59	- 73.564442	45.507326	28-09-18 21:45	28-09-18 22:00

La base de données relative aux stations donne leur identifiant unique, leur nom, la ville dans laquelle elles sont situées et leur position. La capacité des stations n'est pas fournie, elle est donc approximée par le nombre maximal de réservations simultanées pour chaque station.

L'emplacement des stations peut être vu à la Figure 3.4.

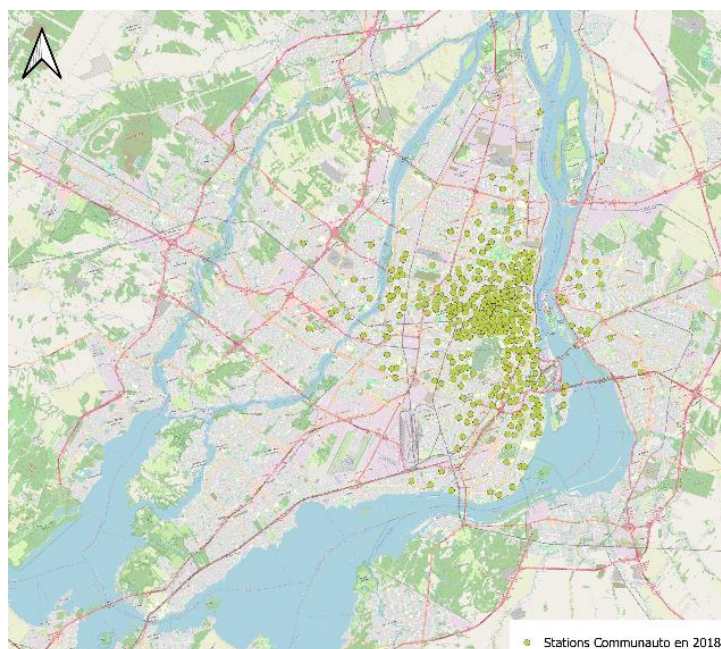


Figure 3.4 Emplacement des stations Communauto

Afin de déterminer le nombre de véhicules disponibles au début de chaque heure dans chaque station, le nombre de véhicules réservés à l'heure considérée ainsi que ceux réservés lors des heures précédentes et non retournés est compté. Ce total représente les véhicules réservés. Le nombre maximal de voitures réservées pour toutes les heures pour chaque station est considérée comme étant la capacité de cette station. Le nombre de véhicules disponibles est ensuite obtenu en soustrayant le nombre de véhicules réservés de la capacité totale de la station. Le résultat est une base de données qui pour chaque début d'heure de la période considérée et chaque station donne le nombre de véhicules disponibles.

### 3.1.3 Vélo privé

Trois bases de données sont utilisées pour analyser l'offre de transport relative au vélo privé : le réseau cyclable à Montréal, le réseau cyclable à Laval et une carte des aménagements cyclables au Canada. Elles sont décrites dans cette section.

Une géobase qui présente une représentation filamentaire des pistes cyclables à Montréal est fournie par la ville de Montréal sur sa plateforme de données ouvertes (Ville de Montréal, 2024). La base de données la plus ancienne qui a pu être trouvée date de 2020, grâce au site web « Web Archive », qui est une archive électronique de pages web, logiciels et autres (Ville de Montréal,

2020). C'est ce jeu de données qui va être utilisé. Pour chaque voie cyclable, les informations suivantes sont fournies : son numéro unique, son type, sa longueur, le nombre de voies, le séparateur et son accessibilité pendant les quatre saisons.

Le réseau est représenté sur la carte montrée à la Figure 3.5.

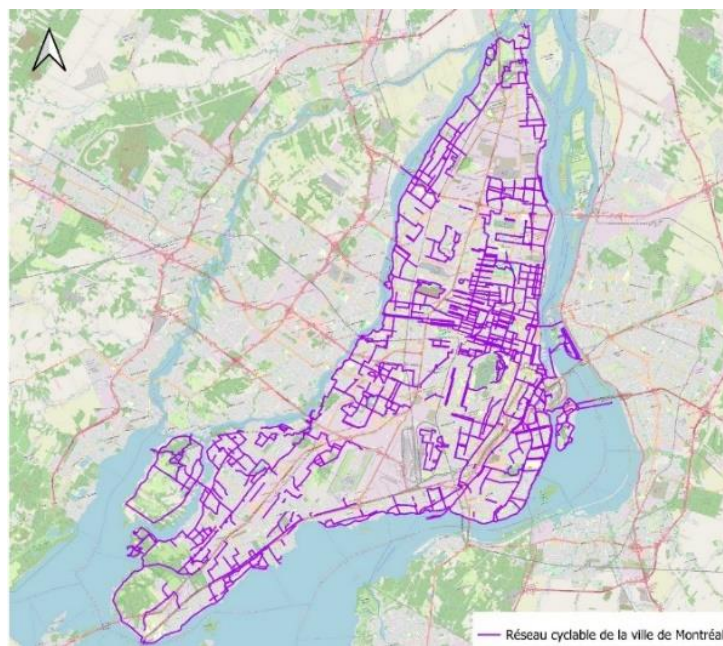


Figure 3.5 Réseau cyclable de la ville de Montréal

La ville de Laval a publié un jeu de données présentant une représentation filamentaire des pistes cyclables et piétonnières sur le territoire lavallois sur la plateforme Données Québec (Ville de Laval, 2023). De même que pour Montréal, la version la plus ancienne de cette base de données qui a été trouvée sur le site web Web Archive date de 2020 (Ville de Laval, 2020). Pour chaque voie, les attributs fournis sont les suivants : type de voie, type d'équipement, revêtement de la voie, numéro de la route verte, nom de la route Vélo-Express, nom du circuit agrotouristique. Les données relatives aux pistes piétonnières ont dû être supprimées en gardant uniquement les voies avec les types suivants : bande cyclable, bande polyvalente cyclable - piétonnière, piste cyclable et piste polyvalente cyclable – piétonnière. Le réseau cyclable est représenté à la Figure 3.6.

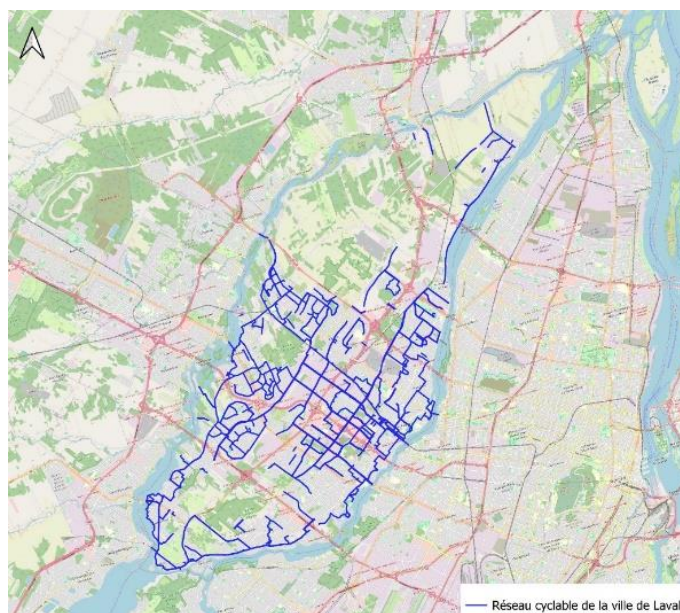


Figure 3.6 Réseau cyclable de la ville de Laval

Le Système de classification du confort et de la sécurité des voies cyclables canadiennes (Can-BICS) est une « convention d'appellation commune des aménagements cyclables » (Winters, Zanotto, & Butler, 2020) développée par des chercheurs à l'université Simon Fraser et à l'agence de la santé publique du Canada. En évaluant plusieurs sources de données ouvertes décrivant les pistes cyclables à travers le Canada, les chercheurs ont trouvé que la nomenclature employée par les différentes villes pour décrire les pistes cyclables est incohérente. Dans le but d'améliorer le contrôle de la qualité des infrastructures cyclables au Canada ils proposent une classification du confort et de la sécurité des voies cyclables, basée sur des « guides de conception technique des transports » ainsi que des « des directives en santé publique » (Winters, Zanotto, & Butler, 2020). Les auteurs proposent donc une classification à trois niveaux : « Voies cyclables très confortables », « Voies cyclables moyennement confortables » et « Voies cyclables peu confortables », basée sur la localisation de la voie par rapport aux autres infrastructures et usagers de la route, si d'autres usagers de la route ont le droit d'utiliser la voie et sa conception (Winters et al., 2020). Le laboratoire de Winters, le Cities, Health and Active Transportation Research lab (CHATR) a appliqué ces classifications aux pistes cyclables à travers le Canada, en se basant sur les données d'Open Street Map (Cities Health and Active Transportation Research lab, 2022).

Des évaluations de qualité des données et des résultats ont été effectuées pour 15 villes Canadiennes, dont Montréal. Après comparaison avec « l'imagerie au sol de Google Street View », les

« l'imagerie aérienne de Google Maps » et d'autres sources, la précision pour l'estimation de la classe de confort était de  $71 \pm 4$  %. Les chercheurs ont trouvé que l'utilisation des données OSM et des données ouvertes résultait en des intervalles confiances très similaires (Cities Health and Active Transportation Research lab, 2022).

Le Cities, Health and Active Transportation Research lab fournit le résultat de sa classification sous forme de données ouvertes, sur le site web Zenodo (Ferster Colin, 2022). Pour chaque segment de voie cyclable, le nom et l'identifiant de la subdivision du recensement, le nom et l'identifiant de la province, l'identifiant dans OSM, le type d'infrastructure et le niveau de confort sont fournis. Les données sur lesquelles les classifications sont faites datent du 25 Janvier 2022 et peuvent être vues sur les Figure 3.7 et Figure 3.8, d'abord pour tout le Canada, ensuite à Montréal et Laval.

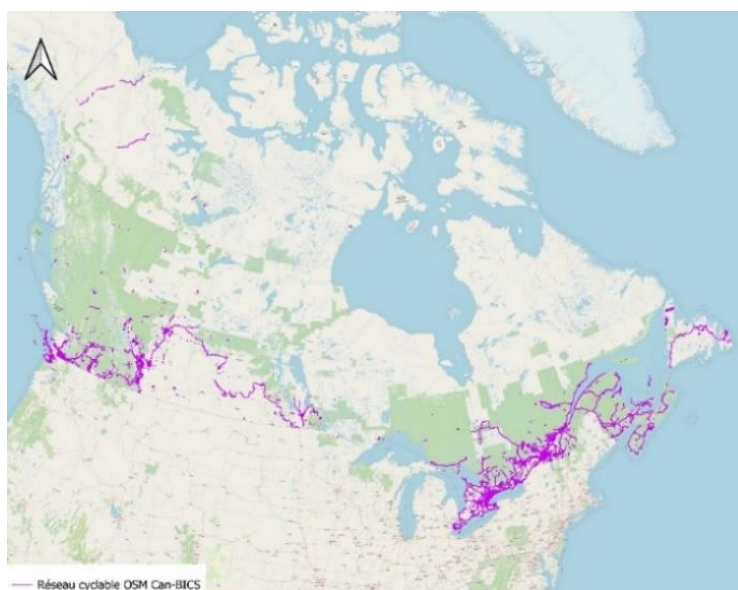


Figure 3.7 Réseau cyclable OSM Can-BICS pour le Canada

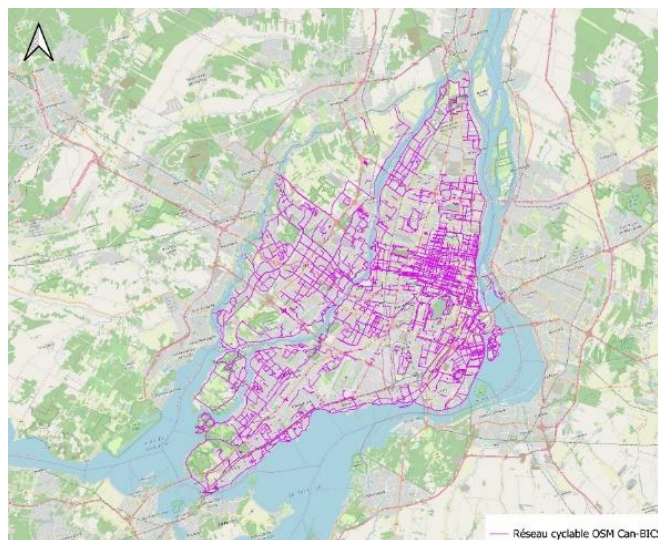


Figure 3.8 Réseau cyclable OSM Can-BICS pour Laval et Montréal

Comme pour l'automobile privée, il y a un faible décalage entre les géobase des villes de Montréal et Laval et celles tirées d'OpenStreetMap. Une zone tampon est créé autour des segments tirés d'OSM, permettant d'assigner le niveau de confort du segment aux pistes cyclables des bases de données des villes.

### 3.1.4 Vélopartage

BIXI Montréal est l'organisme qui gère le vélopartage à Montréal, Laval, Longueuil, Boucherville et Terrebonne. C'est un réseau de 900 stations qui comprend plus de 10 000 vélos en 2023 (BIXI, 2023). En 2018, le réseau était utilisable du 10 avril au 15 novembre.

Une base de données relative à l'état des stations pour l'année 2018 est fournie par BIXI. Pour chaque heure et minute, pour chaque station, le nombre de vélos et points d'ancrage disponibles, ainsi que le nombre de vélos défectueux est donné. Un extrait du jeu de données peut être vu dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Extrait de la base de données décrivant l'état du réseau BIXI

sta_id	et_date	et_nb_vel	et_nb_vid	et_nb_def	et_heure
302	2018.11.10 05:00:00	0	23	0	5:00:00
500	2018.11.12 00:00:00	1	14	0	0:00:00

Pour alléger la base de données et diminuer la complexité des calculs, comme pour les automobiles partagées, seuls les enregistrements au début de chaque heure, donc ceux dont les horodatages ont des minutes et secondes nulles, sont conservés.

La localisation des stations BIXI en 2018, identifiées par leur code et leur nom, est disponible dans une base de données accessible sur le portail des données ouvertes de BIXI (BIXI, 2018). La localisation spatiale de ces stations peut être vue à la Figure 3.9.

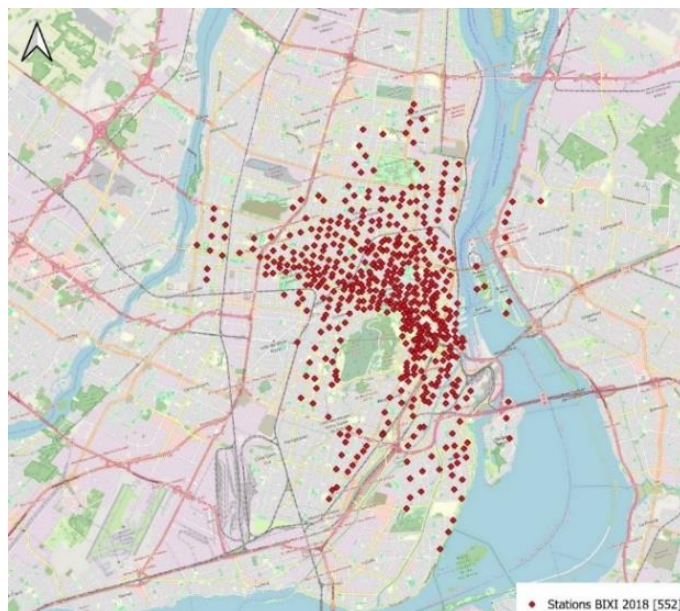


Figure 3.9 Emplacement des stations BIXI

### 3.1.5 Marche

La ville de Montréal fournit la géobase « Trottoir et îlot (Base de données des actifs de voirie) » sur son portail de données ouvertes (V. d. Montréal, 2023). Cette base de données a été filtrée pour ne conserver que les éléments catégorisés comme étant utilisés par les piétons. Cette géobase représente le réseau piéton sous forme de polygones. Pour les calculs nécessitant un réseau linéaire, le contour de ces polygones a été utilisé et la longueur totale a été divisée par deux. La ville de Laval a publié la géobase « Surface de rue et transport actif » sur le portail de données ouvertes Données Québec (Ville de Laval, 2021). Cette base de données contient les infrastructures piétonnes et cyclables. En utilisant l'attribut "type\_surface", toutes les infrastructures cyclables ont été retirées. Les données pour Montréal et Laval ont été mises à jour en juin 2023 et décembre 2021

respectivement, et sont considérées être assez proches des infrastructures qui existaient en 2018. Les réseaux piétonniers des deux villes peuvent être vus à la Figure 3.10.

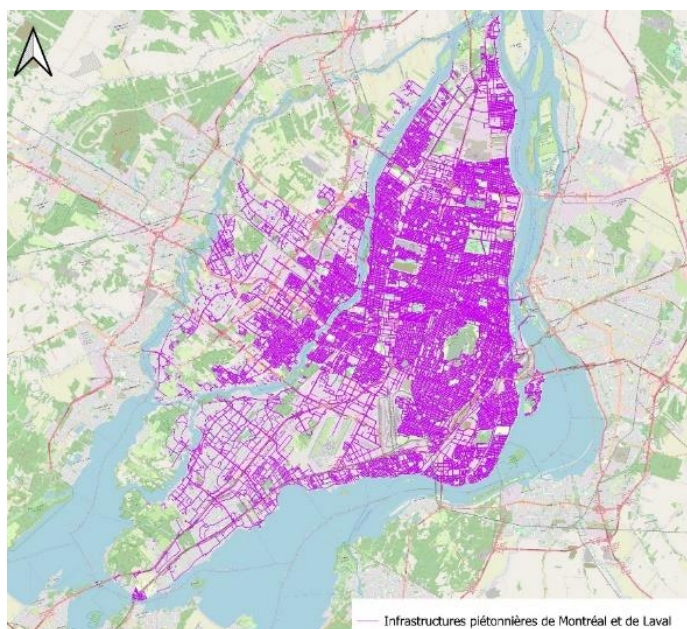


Figure 3.10 Infrastructures piétonnières de Montréal et Laval

D'autres bases de données qui ne sont pas directement reliées à la marche sont utilisées pour les calculs : l'utilisation du sol, les intersections et la densité résidentielle.

Une base de données géoréférencée concernant l'utilisation du sol est publiée par la Communauté métropolitaine de Montréal sur son site web pour l'année 2018 (C. m. d. Montréal, 2018). Les types d'utilisations inclus sont les suivants : Résidentielle, Commerciale, Bureau, Industrie, Institutionnelle, Parc ou espace vert, Utilité publique, Agricole, Terrain vacant, Hydrographie et Golf. Seul l'usage principal d'un territoire est considéré. La carte montrant les utilisations pour le territoire étudié est présentée à la Figure 3.11.

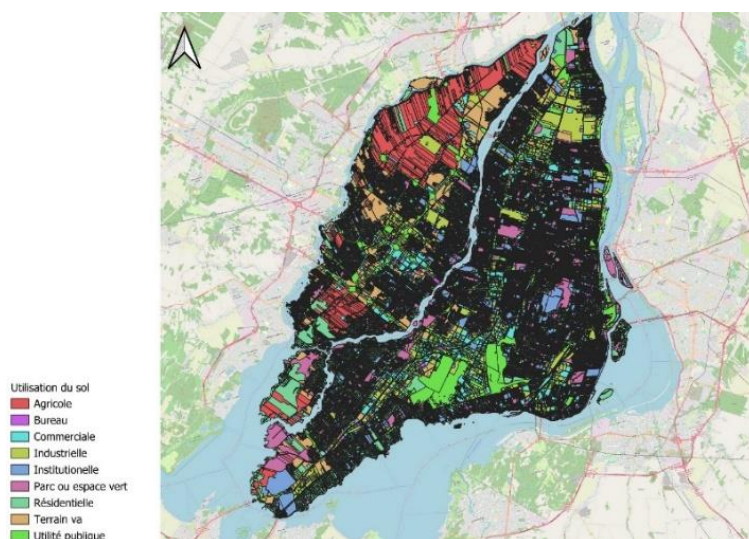


Figure 3.11 Utilisation du sol à Montréal et Laval

La géobase contenant la localisation des intersections routière est intitulée « Road Junction Point » et fait partie de la collection « CanMap Content Suite 2021.3 » publiée par DMTI Spatial Inc. sur la plateforme partagée GeoIndex (DMTI Spatial Inc., 2021). Les intersections peuvent être vues à la Figure 3.12.

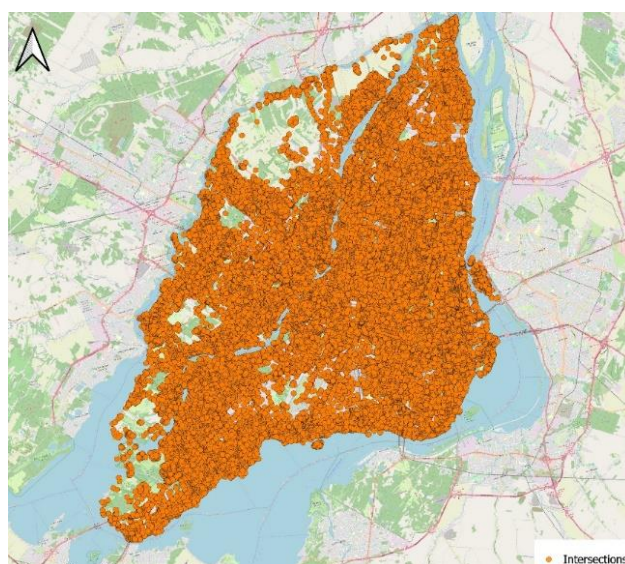


Figure 3.12 Intersections à Montréal et Laval

Les données de nombre de logements sont tirées du recensement de 2016, agrégées par aires de diffusion, qui est la plus petite division pour laquelle les données étaient disponibles. Cette base de données était accessible à partir du portail du CHASS Data Centre de l'Université de Toronto, qui

présente les données obtenues de Statistique Canada (CHASS Data Center, 2016). Une carte montrant le nombre de logements par aire de diffusion est présentée à la Figure 3.13.

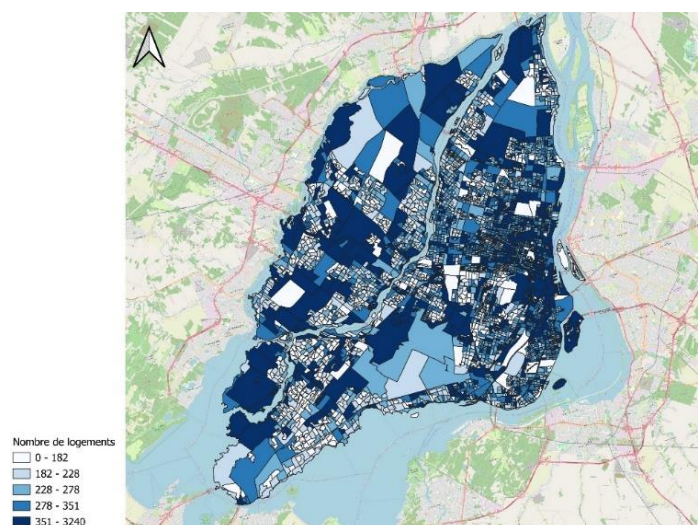


Figure 3.13 Nombre de logements par aire de diffusion à Montréal et Laval

### 3.1.6 Métro

Le métro qui dessert les régions de Montréal, Laval et Longueuil est opéré par la Société de transport de Montréal.

La base de données des incidents du réseau du métro est publiée par la Société de transport de Montréal, sur la plateforme de données ouvertes de la Ville Montréal (Société de transport de Montréal, 2023). Ce jeu de données regroupe tous les incidents qui touchent les trains et stations du métro du premier janvier 2019 au 31 août 2023. Ces données ne sont pas disponibles pour la période étudiée (automne 2018), mais une période comparable a été étudiée, l'automne 2019, de septembre à décembre. Aucune autre base de données qui couvrirait la période étudiée et contenait les informations nécessaires aux calculs nécessaire n'a été trouvée. Pour chaque incident les informations suivantes sont précisées : « le numéro d'incident, le type d'incident (station ou train), les causes primaires et secondaires, le symptôme, la ligne sur laquelle a eu lieu l'incident, le numéro de tournée du train associé à l'accident, la date et l'heure de l'incident, l'heure de reprise du service, le numéro de la voiture de train et de la porte affecté par l'incident, le type de matériel roulant, le code de lieu de l'incident, l'occurrence ou non des événements suivants : la coupure d'alimentation de traction, l'occurrence de dommage matériel, l'utilisation du frein d'urgence par la clientèle, l'implication d'une porte dans l'incident, l'implication de l'équipe urgence métro à la demande de

la salle de contrôle, l'évacuation d'une voiture, d'un train, d'une station ou d'une station et d'un train » (Société de transport de Montréal, 2023). Les colonnes nécessaires pour l'analyse visée dans ce travail peuvent être vues dans l'extrait présenté dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Extrait de la base de données des incidents du réseau du métro

Heure de l'incident	Heure de reprise	Incident en minutes	Code de lieu	Année civile	Année civile/mois	Mois calendrier	Jour du mois	Jour de la semaine	Jour calendaire
23 :32	23 :42	10 à 14 min	Georges-Vanier	2019	12	26	26	4	26-12-19
19 :31	19 :41	02 min et moins	Place-D'Armes	2019	12	9	9	1	9-12-19
7 :28	7 :38	02 min et moins	Rosemont	2019	11	27	27	3	27-11-19

La base de données présente 30794 incidents. En filtrant pour ceux de l'automne 2019, il reste 2759 incidents. Il est précisé dans la description de la base de données que les incidents de type station n'affectent pas le service. Ces données ne seront donc pas considérées dans les analyses. En les excluant, il reste 1754 incidents. Tous les incidents dont le code de lieu n'est pas une station ou un lien entre deux stations est supprimé.

L'autre base de données considérée est celle des données GTFS, qui permettent d'avoir les informations relatives au positionnement des stations et lignes du métro. Le fichier GTFS historique utilisé est celui qui était valide du 26 août 2019 au 5 janvier 2020, correspondant à la période considérée pour les incidents, tirée du site web « Transit Feeds » (Transit Feeds, 2019a), une archive des données sur les transport en commun.

Les lignes de métro sont la ligne verte, la ligne orange, la ligne jaune et la ligne bleue, qui sont représentées avec les stations à la Figure 3.14.

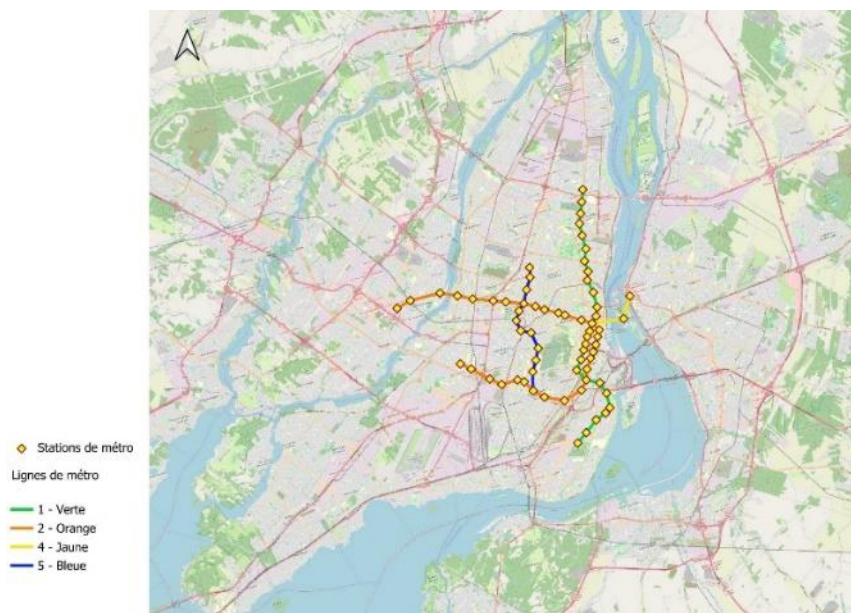


Figure 3.14 Lignes et stations du métro

### 3.1.7 Bus

Les autobus de Montréal sont opérés par la Société de transport de Montréal, et ceux de Laval sont opérés par le Société de transport de Laval (STL). Les données GTFS sont essentielles pour obtenir des informations sur la localisation des arrêts et des lignes d'autobus. Pour les autobus de la STM, ces données sont également utilisées pour calculer les intervalles entre les autobus. Le fichier GTFS historique utilisé pour les autobus de la STM couvre la période du 23 juin 2023 au 4 avril 2024 et est accessible sur le site web "Transit Feeds" (Transit Feeds, 2023). Cette période a été choisie afin de garantir la compatibilité avec les données de ponctualité utilisées dans l'étude. Pour les autobus de la STL, le fichier GTFS historique utilisé couvre la période du 25 août 2018 au 4 janvier 2019 (Transit Feeds, 2018). Les lignes de bus de la STL et de la STM peuvent être visualisées sur la carte à la Figure 3.15.

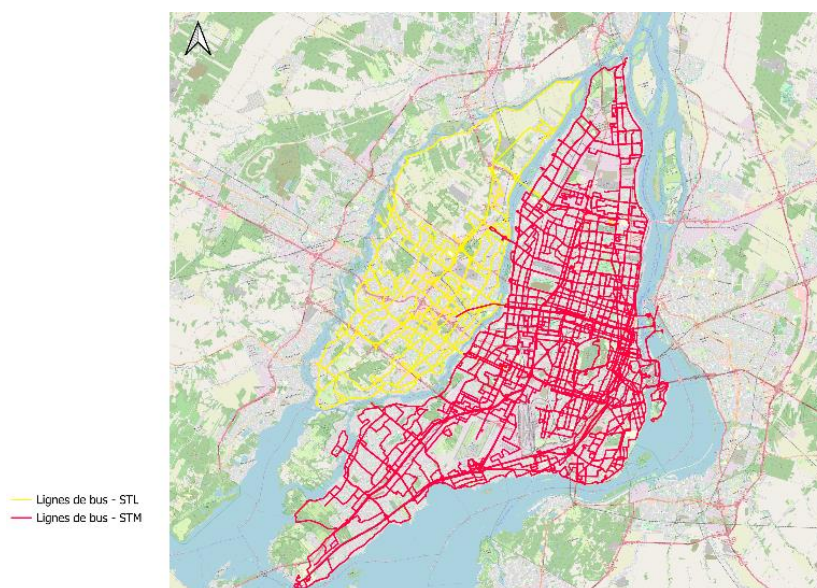


Figure 3.15 Lignes d'autobus de la STM et de la STL

Les données de ponctualité et de charge à bord ont été fournies par la STL, pour la période de septembre à décembre 2018. Pour chaque date, ligne, voyage et arrêt, les heures d'arrivée et de départ planifiées et réelles sont données. Un extrait simplifié est présenté dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Extrait de la base de données concernant la ponctualité des autobus de la STL

Date	Ligne	ID_Voyage	Arret_Chro nobus	H_PLANIFI E_SEC28	H_ARR_RE EL28	H_DEP_RE EL28
09-12-18	26	1123633	42508	80363	80360	80364
12-12-18	45	1135380	41742	30098	30414	30416

A partir de cette base de données, le nombre de voyages en retard (de 3 minutes ou plus) et en avance (d'une minute ou plus) par jour et par arrêt est calculé.

Les données concernant la ponctualité de la STM ont été calculées à partir de fichiers GTFS Realtime, une extension des fichiers GTFS qui fournissent des mises à jour en temps réel (Mobility Data, 2024), collectées par Yuxuan Wang dans le cadre de son projet qui est une étude longitudinale de la fiabilité du transport en commun. Elle a ensuite produit une base de données indiquant le nombre de trajets planifiés, effectués à temps, en retard (de 3 minutes ou plus), en avance (d'une minute ou plus) et non-réalisés par jour et par arrêt. Cette base de données couvre la période de septembre à décembre 2023, la seule période non affectée par la pandémie pour laquelle les

données étaient disponibles. Un extrait simplifié de cette base de données est présenté dans le Tableau 3.7, les colonnes représentent la date de l'enregistrement, l'identifiant de l'arrêt et le nombre de passages planifiés, réalisés, en avance, à temps et en retard.

Tableau 3.7 Extrait de la base de données concernant la ponctualité des autobus de la STM

start_date	stop_id	scheduled	recorded	early	on_time	late
20230901	50101	127	127	20	67	40
20230901	50102	80	76	11	46	19

### 3.1.8 Train de banlieue

Les trains de banlieue de la région métropolitaine de Montréal et ses environs sont opérés par la compagnie Exo, qui était connue sous le nom de Réseau de transport métropolitain ou RTM avant le 23 mai 2018. Le territoire desservi par Exo inclut les 82 municipalités de la communauté métropolitaine, la ville de Saint-Jérôme et la réserve de Kahnawake, grâce à des autobus et des trains de banlieue (Ministère de l'Emploi et de la Solidarité Sociale, 2016). Comme établi précédemment, l'étude se limite aux territoires de Montréal et Laval, excluant donc les bus d'Exo de l'analyse. Deux jeux de données sont utilisés : des données relatives à la ponctualité des passages des trains et les données GTFS.

La base de données relative à la ponctualité des passages des trains a été fournie par Exo, et permet de voir pour chaque jour, du premier septembre au 31 décembre 2018, et pour chaque gare et garage, le numéro du voyage, la séquence d'arrêts, ainsi que les heures d'arrivée et de départ planifiées et réelles, avec une précision à la seconde. Le jeu de données présente 140748 observations, pour 72 arrêts. Un extrait de cette base de données est présenté dans le Tableau 3.8.

Tableau 3.8 Extrait de la base de données relative à la ponctualité des passages des trains Exo

Organis ation	DateArr	NomLong	Voy age	Nom arret	Sequenc eArret	HeureA rriveePl anifiée	HeureA rriveeR eelle	HeureD epartPl anifiée	HeureD epartRe elle
TRAINS	02-10-18	exo6 - Deux-Montagnes	965	Garage	14	12:34:15 AM	11:11:57 PM	12:35:00 AM	11:11:57 PM
TRAINS	02-10-18	exo6 - Deux-Montagnes	965	Garage	14	12:34:15 AM	11:15:49 PM	12:35:00 AM	11:15:49 PM

Les données du fichier GTFS qui sont intéressantes dans le cadre des calculs à faire pour mesurer l'offre des trains de banlieue sont l'emplacement des arrêts et le tracé des lignes de train. Le fichier GTFS historique le plus proche de la période étudiée disponible en ligne est celui qui est valide du 21 mai 2019 au 31 décembre 2019, sur le site web « Transit Feeds » (Transit Feeds, 2019b). Comme les heures de passages sont déjà disponibles dans la base de données relative à la ponctualité, le fait que le fichier ne correspondent pas exactement à la période étudiée ne pose pas de problèmes. Il est surtout important d'avoir des données qui précèdent la fermeture de la ligne Deux-Montagnes, qui a eu lieu le premier janvier 2021 (Exo, 2021).

En automne 2018, les lignes de train en service sont les suivantes : Vaudreuil-Hudson, Deux-Montagnes, Mont-Saint-Hilaire, Saint-Jérôme, Candiac et Mascouche. Celles-ci, ainsi que les arrêts, peuvent être vus sur la carte à la Figure 3.16.

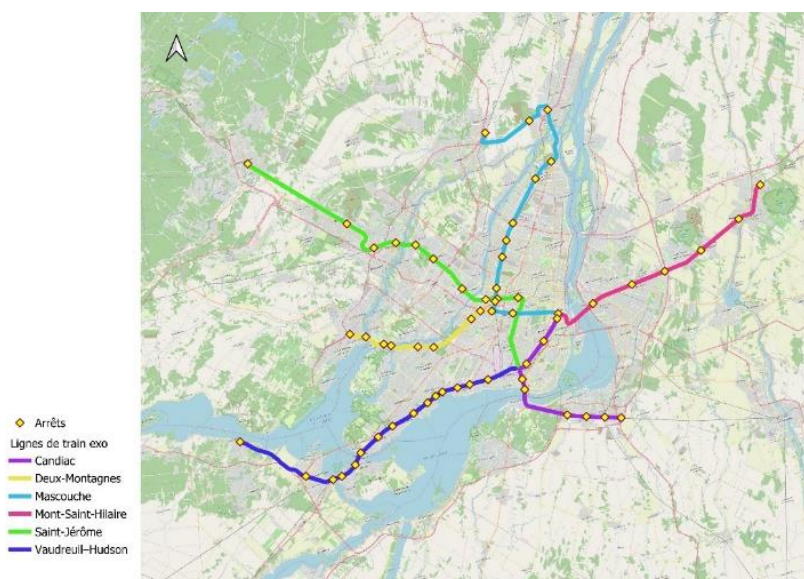


Figure 3.16 Lignes de train Exo et les arrêts

### 3.1.9 Caractéristiques des secteurs de recensements

Une base de données concernant les caractéristiques des secteurs de recensement est établie en se basant sur des données du recensement canadien réalisé en 2016, accessibles à partir du portail du CHASS Data Centre de l'Université de Toronto, qui présente les données obtenues de Statistique Canada (CHASS Data Center, 2016).

Les attributs de cette base de données qui sont utilisés directement et sans calculs sont : la densité de la population au kilomètre carré, l'âge moyen de la population, la taille moyenne des ménages privés, le revenu total médian des ménages en 2015, la valeur médiane des logements et le taux d'emploi.

Le taux de vieux logements défini comme le nombre de logements construits il y a plus de 60 ans divisé par le nombre total de logements (Roth, 2016), est calculé en divisant le nombre de logements « construit en 1960 ou avant » fourni par le recensement par le nombre de logements total.

De façon similaire, le taux de nouveaux logements, défini comme le nombre de logements construits dans les dix dernières années divisées par le nombre total de logements (Roth, 2016), est calculé en divisant le nombre de logements construits de 2006 à 2016 (les catégories disponibles étant 2006 à 2010 et 2010 à 2016) par le nombre de logements total.

Le taux de trajets domicile-travail à l'intérieur du secteur de recensement est calculé en divisant le nombre de trajets domicile-travail réalisés à l'intérieur du secteur de recensement par le nombre total de trajets domicile réalisés par les habitants du secteur de recensement.

En se basant sur la base de données relative à l'utilisation du sol décrite dans la section 3.1.5, la part du territoire urbanisée par secteur est calculé, en considérant que les zones marquées comme résidentielle, commerciale, bureau, industrie, institutionnelle et utilité publique étaient des zones urbaines et que les parcs ou espace verts, zone agricole, terrain vacant, hydrographie et golf étaient des zones non-urbaines. Le pourcentage est l'aire des zones urbaines divisée par l'aire totale de l'aire du recensement.

Une ou plusieurs de ces informations n'étaient pas disponibles pour 28 des secteurs de recensement, qui ont été exclus.

## **3.2 Formules de mesure de l'offre**

En se basant sur les travaux de (Rahimi-Golkhandan et al., 2019), les deux premiers éléments pris en compte sont la disponibilité et l'accessibilité aux modes au sein de la zone, qui permettent de mesurer respectivement la richesse d'une zone en un mode et l'homogénéité d'accès à ce mode à travers la zone.

Litman (2001) met l'accent sur l'importance de mesurer la qualité de service pour évaluer la multimodalité d'un système de transport en présentant plusieurs indicateurs de performances pour différents modes mais aussi pour le système global. Il n'est pas suffisant que l'offre soit disponible et accessible, si le niveau de service est considéré bas par les usagers, ils n'utiliseront pas le mode (Friman, Lättman, & Olsson, 2020). C'est pourquoi le troisième élément pris en compte dans la mesure de l'offre d'un mode dans une zone est la qualité de service du mode.

Pour chacun des modes considérés (l'automobile privée, l'autopartage, le vélo privé, le vélopartage, la marche, le métro, l'autobus et le train de banlieue) un indicateur qui mesure l'offre est établi en prenant en compte la disponibilité des modes, leur accessibilité et leur qualité de service. Cette partie présente la formulation de chacun des indicateurs dans cet ordre.

### **3.2.1 Mesures de disponibilités**

La mesure de disponibilité des modes dans les zones utilisées dans le cadre de cette maîtrise est celle de la richesse développée par Rahimi-Golkhandan et al (2019), qui la décrivent comme une mesure de la « quantité de modes de transport offerts dans une zone » ou de la « disponibilité modale ». Il se basent sur plusieurs études pour déterminer des mesures pour le réseau routier, les transports en commun, les pistes cyclables et les chemins piétonniers (Rahimi-Golkhandan et al., 2019). Le but de cette mesure est de quantifier la présence des infrastructures nécessaires à l'utilisation des modes dans chaque zone, en d'autres termes de mesurer son « abondance ».

En se basant sur le constat de Xie et Levinson (2009), que plus un réseau est dense, plus il est développé, (Xie & Levinson, 2009) la mesure de la richesse des réseaux routier, cyclable et piéton est leur densité. C'est une mesure qui a souvent été utilisée dans la littérature pour ces réseaux.

Pour tous les systèmes de transport en commun (bus, métro et train), la mesure est inspirée de celle de Derrible et Kennedy (2010). Elle prend en compte les deux éléments principaux d'un réseau de transport en commun : les lignes et les stations, qui représentent la « quantité » de transport en commun offerte. Le nombre de stations et lignes est ensuite divisé par l'aire de la zone considérée, par souci d'uniformité avec les mesures de disponibilité d'autres modes.

#### **3.2.1.1 Automobile privée**

La mesure de la disponibilité associée à l'utilisation de l'automobile privée est la densité du réseau routier, comme c'est l'infrastructure nécessaire à l'utilisation de ce mode.

La disponibilité de l'offre de ce mode est la suivante :  $D_{RR} = \frac{L_{RR}}{A}$

Où  $D_{RR}$  : La mesure de disponibilité du réseau routier

$L_{RR}$  : La longueur du réseau routier dans la zone considérée

$A$  : L'aire de la zone considérée

Pour calculer cet indicateur pour chaque zone, le logiciel QGIS est utilisé. Tout d'abord, les tronçons de routes sont segmentés par les limites des zones à l'aide de la fonction « Split with lines ». Ensuite, la longueur totale des routes dans chaque zone est calculée en mètres avec la fonction « Sum line lengths ». Enfin, cette somme est divisée par la superficie de la zone en mètres carrés.

### 3.2.1.2 Autopartage

Le service d'autopartage est offert sous deux formes, comme expliqué dans la section concernant les bases de données liées à l'autopartage, en station et en libre-service.

La disponibilité de ce service est directement liée au nombre de voitures disponibles à tout moment. La littérature ne propose pas d'indicateurs qui évaluent la disponibilité de ce mode de cette manière au niveau d'une zone. Par conséquent, l'indicateur de disponibilité pour l'autopartage est basé sur celui du vélopartage, en raison de la similarité entre ces services et de la manière dont leur disponibilité est mesurée. En effet, dans les deux cas, la disponibilité est déterminée par le nombre de voitures ou de vélos disponibles à un moment donné. Les différences à considérer sont l'absence de contrainte de points d'ancrage pour les automobiles et l'existence de deux types de service.

La disponibilité d'automobiles partagées ( $dap$ ) à un endroit  $e$  à un moment  $t$  est donc définie de la façon suivante :

$$dap_{e,t} = \begin{cases} 1 & \text{si dans un rayon de 300 mètres au moins 5 voitures sont disponibles} \\ & \text{en station ou en libre-service} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

O'Mahony & Shmoys (2015) ont réalisé une étude sur le service de vélopartage à New York City afin de déterminer le nombre minimal de vélos qu'il doit y avoir à une station pour considérer que le service est disponible à cette station, et ont trouvé que ce nombre était de 5.

Une étude similaire appliquée à l'autopartage aurait pu indiquer la valeur limite de véhicules acceptable, mais comme cela n'a pas été trouvé dans la littérature, la même valeur de 5 véhicules est utilisée. Ce choix de valeur représente donc une limite et devrait être mise à l'épreuve dans des travaux futurs centrés sur l'autopartage.

La disponibilité moyenne par plage horaire est ensuite définie :

$$dapm_{e,ph} = \text{moyenne}_{t \in ph} dap_{e,t}$$

Où  $dap_{e,ph}$  : La disponibilité moyenne d'automobiles partagées à un endroit  $e$  pour une plage horaire  $ph$

Les plages horaires sont celles utilisées pour le vélopartage :

- Plage horaire 1 (ph1) : 00h à 05h
- Plage horaire 2 (ph2) : 05h à 08h
- Plage horaire 3 (ph3) : 08h à 12h
- Plage horaire 4 (ph4) : 12h à 16h
- Plage horaire 5 (ph5) : 16h à 20h
- Plage horaire 6 (ph6) : 20 h à 00h

La disponibilité moyenne globale est calculée de la façon suivante :

$$dapm_e = \frac{\alpha_1 dapm_{e,ph1} + \alpha_2 dapm_{e,ph2} + \alpha_3 dapm_{e,ph3} + \alpha_4 \times dapm_{e,ph4} + \alpha_5 dapm_{e,ph5} + \alpha_6 dapm_{e,ph6}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6}$$

Où  $dapm_e$  : La disponibilité moyenne globale d'automobiles partagées à un endroit  $e$

$\alpha_i$  : Le coefficient associé à plage horaire  $i$

Tous les coefficients sont considérés comme égaux à 1, car la disponibilité à toutes les plages horaires est jugée comme étant d'importance égale. La  $dapm_e$  est égal à 1 si, à tout moment, il y a suffisamment de voitures partagées dans un rayon de 300 mètres, et il est nul si un nombre suffisant de voitures partagées n'est jamais disponible dans ce rayon.

Cet indicateur est calculé pour chaque centroïde de sous-division. Le nombre de véhicules disponibles pour chacun des deux services est calculé séparément. Pour le service en station, les stations situées dans un rayon de 300 mètres autour d'un centroïde sont identifiées à l'aide du

logiciel QGIS en réalisant une intersection entre la zone tampon et les stations. Le nombre total de voitures disponibles est ensuite déterminé. Pour le service FLEX, une intersection spatiale est calculée pour chaque heure avec les zones tampons des centroïdes, permettant de comptabiliser le nombre de voitures disponibles. Enfin, pour chaque centroïde, la somme des voitures disponibles est calculée pour chaque heure et l'indicateur est déterminé en fonction du nombre de voitures.

### 3.2.1.3 Vélo privé

De la même façon que pour l'automobile privée, la mesure de disponibilité associée au vélo privé est celle du réseau cyclable.

La disponibilité de l'offre de ce mode est la suivante :  $D_{RC} = \frac{L_{RC}}{A}$

Où  $D_{RC}$  : La mesure de disponibilité du réseau cyclable

$L_{RC}$  : La longueur du réseau cyclable dans la zone considérée

$A$  : L'aire de la zone considérée

La façon de calculer cet indicateur est la même que celle de l'automobile privée, en utilisant le réseau cyclable au lieu du réseau routier.

### 3.2.1.4 Vélopartage

Une des mesures typiquement utilisées pour déterminer le niveau de service d'un système de vélo partage est le pourcentage de stations problématiques dans le système, en définissant une station problématique comme étant une station qui est complètement vide ou complètement pleine (Fricker & Gast, 2016). Ashqar et al (2022) présentent une adaptation de cet indicateur qui est appliqué à la station, au lieu du système. Pour construire leur indicateur, les auteurs proposent de considérer comme fonctionnelles les stations pour lesquelles le nombre de vélos et de points d'ancrage disponibles sont supérieurs à une certaine limite (Ashqar et al., 2022). Dans le cadre de ce projet, cette définition d'une station fonctionnelle est utilisée et appliquée dans le calcul de l'indicateur de disponibilité aux stations de vélo-partage proposé par (Kabra et al., 2019). En se basant sur des études précédentes, les auteurs définissent le nombre de vélos limites pour une station comme 5 vélos pour une « grande » station (qui est définie comme une station avec une capacité supérieure à 20) et 1 ou 2 pour une « petite » station (ayant une capacité inférieure à 20) (Kabra et al., 2019).

La limite choisie pour les petites stations est de 2, en se basant sur les applications de Caggiani & Camporeale (2021).

Comme expliqué dans la section sur la disponibilité de l'autopartage, la limite de 5 vélos ou plus a été déterminée par O'Mahony & Shmoys (2015) à la suite de leurs travaux d'analyse de la demande d'un service de vélo-partage à New York. Cette même valeur a été utilisée directement, mais les résultats auraient été plus précis si une étude similaire avait été réalisée sur le réseau de BIXI pour déterminer le nombre minimum de vélos disponibles nécessaires.

Kabra et al. (2019) définissent d'abord la disponibilité de vélos ( $dv$ ) à un endroit  $e$ , à un temps  $t$  de la façon suivante :

$$dv_{e,t} = \begin{cases} 1 & \text{si une station dans un rayon de 300 mètres est fonctionnelle} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Ils définissent ensuite la disponibilité moyenne de vélos par plage horaire, en divisant la journée en six plages horaires dans lesquelles ils jugent que le comportement des individus varie :

$$dvm_{e,ph} = \text{moyenne}_{t \in ph} dv_{e,t}$$

Où  $dvm_{e,ph}$  : disponibilité moyenne de vélos à un endroit  $e$  pour une plage horaire  $ph$

Les plages horaires proposées sont les suivantes : tôt le matin (05h30-08h00), période de pointe du matin (08h00-12h00), après-midi (12h00-16h00), soirée (16h00-20h00), fin de soirée (20h00-00h30), et nuit (00h30-05h30).

Afin d'adapter les calculs aux données disponibles, donc pour éviter des plages horaires qui ne commencent pas au début de l'heure, ces plages horaires ont été légèrement modifiées de la façon suivante :

- Plage horaire 1 (ph1) : 00h à 05h
- Plage horaire 2 (ph2) : 05h à 08h
- Plage horaire 3 (ph3) : 08h à 12h
- Plage horaire 4 (ph4) : 12h à 16h
- Plage horaire 5 (ph5) : 16h à 20h
- Plage horaire 6 (ph6) : 20 h à 00h

Et la disponibilité moyenne globale est calculée de la façon suivante :

$$dvm_e = \frac{\alpha_1 dvm_{e,ph1} + \alpha_2 dvm_{e,ph2} + \alpha_3 dvm_{e,ph3} + \alpha_4 \times dvm_{e,ph4} + \alpha_5 dvm_{e,ph5} + \alpha_6 dvm_{e,ph6}}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6}$$

Où  $dvm_e$  : La disponibilité moyenne globale à un endroit  $e$

$\alpha_i$  : Le coefficient associé à la plage horaire  $i$

Si une plus grande ou plus petite importance doit être donnée à une des plages horaires, selon le contexte d'utilisation de cet indicateur, cela peut être fait grâce aux coefficients  $\alpha$ . Dans le contexte de projet, les plages horaires sont considérées comme étant d'importances égales, et les coefficients  $\alpha$  sont tous considérés comme étant égaux à 1.

La  $dvm_e$  est égal à 1 si en tout temps, une station fonctionnelle est disponible dans un rayon de 300 mètres de l'endroit  $e$ , et nulle si une station fonctionnelle n'est jamais disponible dans ce rayon.

Pour calculer cet indicateur, les stations BIXI situées dans un rayon de 300 mètres autour du centroïde de chaque sous-division sont d'abord identifiées par intersection spatiale à l'aide du logiciel QGIS. Ensuite, chaque station est évaluée afin de déterminer si elle est fonctionnelle en fonction de sa capacité ainsi que du nombre de vélos et de points d'ancrage disponibles. Pour chaque heure et chaque sous-division, l'indicateur est calculé en vérifiant si au moins une station fonctionnelle est associée au centroïde. Enfin, la moyenne de ces valeurs est calculée sur la période considérée pour chaque zone, ce qui reflète la disponibilité fonctionnelle des stations BIXI par zone.

### 3.2.1.5 Marche

Suivant la même logique utilisée pour la voiture et le vélo privés, la mesure de disponibilité de la marche est la densité du réseau piétonnier.

La disponibilité de l'offre de ce mode est la suivante :  $D_{RP} = \frac{L_{RP}}{A}$

Où  $D_{RP}$  : La mesure de disponibilité du réseau piétonnier

$L_{RP}$  : La longueur du réseau piétonnier dans la zone considérée

$A$  : L'aire de la zone considérée

La façon de calculer cet indicateur est la même que celle de l'automobile privée, en utilisant le réseau piétonnier au lieu du réseau routier.

### 3.2.1.6 Transports en commun

La même mesure est utilisée pour l'autobus, le métro et le train dans les travaux de Rahimi-Golkhandan et al. (2019).

La formule de cette mesure est la suivante :  $D_{TC} = (\frac{n_s}{N_S^T \times A})(\frac{n_l}{N_L^T})$

Où  $D_{TC}$  : La mesure de disponibilité du type de transport en commun considéré

$n_s$  : Le nombre de stations dans la zone considérée

$N_S^T$  : Le nombre total de stations dans le système considéré

$n_l$  : Le nombre de lignes dans la zone considérée

$N_L^T$  : Le nombre total de lignes dans le système considéré

$A$  : L'aire de la zone considérée

L'objectif de cette formule est de tenir compte de la proportion du réseau située dans une zone donnée. Cependant, cela ne reflète pas toujours la disponibilité réelle du mode de transport. Par exemple, si un arrêt d'autobus est supprimé, le score de disponibilité des autres stations augmente sans qu'une amélioration du réseau n'ait été réalisée. C'est pourquoi cette mesure a été modifiée pour ce projet et devient ainsi une mesure du nombre de stations multiplié par le nombre de lignes par mètre carré, ce qui la rend comparable aux mesures de disponibilité d'autres modes, qui sont également basées sur la densité.

La nouvelle formule est la suivante :  $D_{TC} = (\frac{n_s \times n_l}{A})$

Où  $D_{TC}$  : La mesure de disponibilité du type de transport en commun considéré

$n_s$  : Le nombre de stations dans la zone considérée

$n_l$  : Le nombre de lignes dans la zone considérée

$A$  : L'aire de la zone considérée

Pour effectuer ce calcul, le nombre de stations dans chaque zone est compté à l'aide de la fonction « Count point in polygon » du logiciel QGIS. Une zone tampon de 100 mètres est considérée, car les stations se trouvent souvent sur les routes qui délimitent les divisions et ne sont pas comptabilisées dans les zones auxquelles elles appartiennent réellement. Pour déterminer le

nombre de lignes, celles-ci sont d'abord segmentées selon les limites des zones. Ensuite, le nombre de lignes ayant un nom unique dans chaque zone est compté. Il est important de noter que les tracés des lignes provenant des données GTFS de la STL sont différenciés par direction, contrairement à ceux de la STM. Par conséquent, les lignes de la STM sont multipliées par deux pour refléter cette différence.

### 3.2.2 Mesures d'accessibilité

Les mesures d'accessibilité employées dans ce projet sont celles développées par Rahimi-Golkhandan (2019) dans le même article mentionné précédemment, qui traite de la caractérisation et de la mesure de la diversité des infrastructures de transport.

En plus de la disponibilité des modes de transport dans une région, il est important de mesurer si les résidents à travers une région ont une capacité comparable à atteindre ou à accéder aux modes disponibles. Un système de transport multimodal ne peut offrir le potentiel de complémentarité modale que s'il est proportionnellement réparti dans une région (Rahimi-Golkhandan et al., 2019). Le but de cette mesure est donc de mesurer l'homogénéité de la répartition du mode dans une zone.

La zone de chalandise pédestre (généralement de 500 à 800 mètres) autour des stations de métro ou des arrêts de bus est une méthode largement utilisée pour analyser quelles parties d'une zone sont accessibles. Cependant, elle détermine la zone considérée comme étant à une distance de marche raisonnable d'une station de métro ou d'un arrêt de bus. En réalité, les gens marchent, font du vélo ou conduisent pour utiliser ces modes ; donc la zone de chalandise pédestre présente des lacunes lorsqu'il s'agit de déterminer quelles parties d'une zone sont potentiellement atteintes en utilisant ces modes. De plus, son applicabilité à d'autres modes que le transport en commun est limitée. Pour éviter ces problèmes, la mesure d'uniformité mesure la répartition des modes à travers une région en trouvant la distance la plus courte des sous-régions à un point d'accès pour chaque mode. L'écart-type de la distance la plus courte des sous-régions à un mode indique dans quelle mesure ce mode est distribué de façon homogène dans une région. Cette mesure est ensuite mise à l'échelle par la racine carrée de la superficie de la région (Rahimi-Golkhandan et al., 2019).

La formule de la mesure proposée est la suivante :

$$Acc = \frac{\sigma_d}{\sqrt{A}}$$

Où  $Acc$  : La mesure d'accessibilité

$\sigma_d$  : L'écart-type des distances les plus courtes des sous-divisions à un mode de transport

$A$  : L'aire de la zone considérée

Plus le mode est bien réparti et accessible à tous, plus l'écart-type est réduit et la mesure tend vers 0. Cette mesure évolue donc de manière inverse à la mesure de disponibilité, qui augmente lorsque le mode est plus disponible. Pour résoudre ce problème, la mesure d'accessibilité est normalisée avec la méthode min-max selon la formule ci-dessous, puis elle est soustraite de 1.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (de \text{ Amorim, Cavalcanti, \& Cruz, 2023})$$

La formule de l'accessibilité est donc la suivante :

$$Acc = 1 - \left( \frac{\sigma_d}{\sqrt{A}} \right)_{normalisé}$$

Où  $Acc$  : La mesure d'accessibilité

$\sigma_d$  : L'écart-type des distances les plus courtes des sous-divisions à un mode de transport

$A$  : L'aire de la zone considérée

Pour calculer cet indicateur, la distance entre le centroïde de chaque sous-division d'une zone et l'infrastructure de transport la plus proche est calculée à l'aide de l'outil « Distance to nearest hub». Enfin, l'écart-type de ces distances est déterminé pour chaque zone.

En termes d'application, pour les réseaux, la distance mesurée est la plus proche à vol d'oiseau au centroïde du lien du réseau le plus proche. Pour le transport en commun et les modes partagés, la distance considérée est celle à la station la plus proche (Rahimi-Golkhandan et al., 2019).

### 3.2.3 Mesure de qualité de service

Les mesures de qualité de service sont calculées au niveau des différentes infrastructures dans chaque zone. Cette section présente les indicateurs issus de la littérature pour chaque mode de transport.

### 3.2.3.1 Automobile privée et partagée

L'indicateur de qualité pour les automobiles privées et partagées est identique, car il évalue la qualité de l'infrastructure routière, utilisée par tout type d'automobile. Un des indicateurs de la qualité de service offert aux utilisateurs de la route est la mesure de la congestion (Haas, Felio, Lounis, & Cowe Falls, 2009). Une des mesures de congestion utilisée qui reflète l'expérience des voyageurs est le Travel Rate Index (TRI). Cet indicateur compare les vrais temps de parcours enregistrés aux temps de parcours en écoulement libre; il peut aussi être considéré comme le temps de parcours en roulant à la vitesse limite (Lomax & Schrank, 2002). La formule utilisée est la suivante :

$$TRI = \frac{\text{Temps de parcours enregistré}}{\text{Temps de parcours en écoulement libre}}$$

Dans le cadre de ce projet, le rapport des vitesses est utilisé et l'indicateur est calculé pour chaque segment selon la formule suivante :

$$IQS, RR_s = \frac{\text{Vitesse moyenne enregistrée}_s}{\text{Vitesse limite}_s}$$

Où  $IQS, RR_s$  : L'indicateur de Qualité du Réseau Routier pour le segment  $s$ .

Plus l'indicateur est grand, moins il y a de congestion, indiquant une meilleure qualité de service pour les usagers de la route.

Pour calculer la qualité de service au niveau de la zone, la moyenne pondérée par la longueur des segments routiers est calculée, selon la formule suivante :

$$IQS, RR_z = \frac{\sum_{s \in z} L_s \times IQS, RR_s}{\sum_{s \in z} L_s}$$

Où  $IQS, RC_z$  : L'indicateur de qualité du réseau routier dans la zone  $z$

$L_s$  : La longueur du segment de route  $s$

$IQS_s$  : L'indicateur de qualité de service du segment routier  $s$

Le rapport entre les vitesses enregistrées et les vitesses limites est calculé pour chaque tronçon. Ces tronçons sont ensuite segmentés selon les limites des zones. La longueur de chaque nouveau tronçon est calculée dans QGIS et multipliée par l'indicateur de congestion. Ensuite, la somme de

ces produits est calculée, puis divisée par la somme des longueurs des tronçons. Pour les zones où aucun segment n'a de vitesse enregistrée, l'indicateur de qualité est la moyenne des indicateurs de qualité des zones adjacentes.

### 3.2.3.2 Vélo privé et partagé

La qualité de service pour le vélo privé et partagé est celui des pistes cyclables. Comme expliqué dans la section 3.1.3, la base de données utilisée fournit une classification de la qualité des pistes cyclables, selon le système de classification du confort et de la sécurité des voies cyclables canadiennes (Can-BICS) (Winters et al., 2020). Chaque piste cyclable appartient à une des catégories suivantes : « voie cyclable très confortable », « voie cyclable moyennement confortable », « voie cyclable peu confortable » ou « voie cyclable non-conforme ». Les voies cyclables non-conformes ne sont pas incluses dans la convention de Can-BCIS mais désignent les pistes cyclables qui ne répondent pas aux critères minimaux de Can-BICS (Cities Health and Active Transportation Research lab, 2022). Chaque niveau est associé à une valeur numérique. Le niveau de qualité supérieur est attribué à 1 pour indiquer la meilleure qualité de service, avec des incréments de 0.25 pour chaque niveau inférieur. Les correspondances entre le niveau de confort et le score sont présentés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 La correspondance entre les niveaux de confort et le score numérique

Classification	Valeur numérique
Très confortable	1
Moyennement confortable	0.75
Peu confortable	0.5
Non-conforme	0.25

Afin de calculer la qualité des pistes dans une zone donnée  $z$ , les scores des pistes sont pondérés par leur longueur, comme montré dans la formule suivante:

$$IQS, RC_z = \frac{\sum_{pc \in z} L_{pc} \times IQS_{pc}}{\sum_{pc \in z} L_{pc}}$$

Où  $IQS, RC_z$  : Indicateur de qualité du réseau cyclable dans la zone  $z$

$L_{pc}$  : Longueur de la piste cyclable  $pc$

$IQS_{pc}$  : Indicateur de qualité de service de la piste cyclable  $pc$

Ce calcul est fait de la même façon que celui de la qualité de service du réseau routier.

### 3.2.3.3 Marche

L'indicateur utilisé pour évaluer la qualité de service de l'offre reliée à la marche est le Walkability Index créé par Lawrence D. Frank en 2004, tel que défini dans sa formulation établie en 2010 (Frank et al., 2010). Celui-ci a été appliqué à la ville de Montréal par Lefebvre-Ropars (2017).

Le Walkability Index est un indicateur composite intégrant quatre variables : la densité résidentielle, la densité des intersections, le coefficient d'occupation du sol des commerces de détails et la mixité des usages. Chaque variable est évaluée par zone.

La densité résidentielle est calculée à l'aide des données du recensement au niveau des aires de diffusion. La formule utilisée pour calculer la densité résidentielle dans une zone  $z$   $DR_z$  est la suivante :

$$DR_z = \frac{\text{Nombre de logements dans la zone } z}{\text{Superficie de la zone}}$$

Pour les divisions du territoire autre que les aires de diffusion, le nombre de logements est considéré comme étant uniformément répartie dans l'aire de diffusion.

La densité d'intersections dans une zone  $z$   $DI_z$  est calculée d'une façon similaire :

$$DI_z = \frac{\text{Nombre d'intersections dans la zone } z}{\text{Superficie de la zone}}$$

Le coefficient d'occupation du sol des commerces de détails est le rapport entre la superficie totale de l'empreinte d'un bâtiment et de la surface qu'il occupe au sol. Plus ce coefficient est grand, plus il y a de chance que le milieu ou le bâtiment est situé soit dense. Le coefficient d'occupation du sol moyen des commerces  $c$  qui sont dans une zone  $z$  est calculé de la façon suivante :

$$COS_z = \frac{\sum_{c \in z} \text{Superficie du plancher}}{\sum_{c \in z} \text{Emprise au sol}}$$

La mixité d'utilisation du sol est mesurée à l'aide de l'indice d'entropie de Shannon, appliqué à chaque zone :

$$MUS_z = \frac{-\sum_{j=1}^n \frac{P_{jz}}{P_z} \times \ln\left(\frac{P_{jz}}{P_z}\right)}{\ln(U)}$$

Où  $MUS_z$  : Mixité d'utilisation du sol de la zone z

$n$  : le nombre de lots dans la zone z

$P_{jz}$  : La superficie des lots j dans la zone z

$P_z$  : la somme des superficies des n lots dans la zone z

$U$  : le nombre de catégories d'utilisation du sol

Les quatre indicateurs sont ensuite normalisés par standardisation, l'indicateur global pour une zone z  $WI_z$  est ensuite calculé de la façon suivante (Frank et al., 2010) :

$$WI_z = DR_z + 2 \times DI_z + COS_z + MUS_z$$

Le coefficient d'occupation du sol des commerces de détails est calculé en considérant que l'emprise au sol correspond à l'aire des bâtiments marqués comme commerce dans la base de données d'utilisation du sol, et que la superficie du plancher est l'attribut "aire moyenne" dans la même base de données. La somme de ces deux aires est calculée pour chaque zone. Si un commerce est coupé par une limite de grille, son emprise au sol et son aire moyenne sont calculées de manière proportionnelle à la partie appartenant à chaque zone. Ensuite, la densité des logements est calculée. De même, pour les grilles coupant les aires de diffusion, le nombre de logements compté dans une case de la grille est proportionnel à la superficie de l'aire de diffusion incluse dans la case. Le nombre de logements est ensuite divisé par l'aire de la division. La densité d'intersections est calculée directement en comptant le nombre d'intersections par zone et en le divisant par l'aire. Ensuite, la mixité d'utilisation du sol est calculée selon le tutoriel disponible sur le site web GeographyRealm (Alexandros Voukenas, 2021). Ensuite, les quatre indicateurs sont normalisés et l'indicateur de qualité par zone est calculé.

### 3.2.3.4 Transport en commun

Le Transit Capacity and Quality of Service Manual propose des mesures de qualité de service de transport en commun se basant sur la disponibilité temporelle et sur le confort et la commodité (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013). Ce sont donc les deux éléments pris en compte pour évaluer la qualité de service des modes de transport en commun.

La disponibilité temporelle n'a pas été intégrée dans la mesure globale de disponibilité présentée dans la section 3.2.1.6, afin de maintenir l'uniformité des mesures entre les modes, étant donné que les autres modes considérés sont seulement restreints par la disponibilité spatiale.

Deux façons d'évaluer la disponibilité temporelle sont proposées : la fréquence et la durée de service. Trois mesures de confort et commodité sont présentées : la charge à bord, la fiabilité et le temps de déplacement. Ces mesures ont été choisies par le Transportation Research Board National Academies of Sciences puisqu'elles sont importantes du point de vue de l'utilisateur et relativement simples à mesurer (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013).

Le choix des mesures pour le métro, le bus et le train de banlieue est fait selon la disponibilité des données.

## Métro

### Disponibilité temporelle

Pour calculer la disponibilité temporelle, les heures de service ainsi que les intervalles des différentes lignes de métro peuvent être calculés à partir des GTFS de la STM pour la période d'automne (septembre à décembre 2018).

L'analyse des intervalles moyens pendant la période de pointe du matin, sur les jours de semaine de 6 h à 9 h, montre des variations limitées entre les stations. Les valeurs se situent toutes entre 2,35 minutes et 5,42 minutes, avec un écart-type de 0,47 pour les 68 stations. Ce constat est similaire pour les heures de service, qui s'étendent de 19 heures à 20 heures en semaine pour les quatre lignes de métro, dans les deux directions, avec un écart-type de 0,38 heure. En vue de comparer la qualité de service entre différentes zones desservies par le métro, ces mesures ne permettent pas de faire de distinctions significatives. Une autre mesure envisageable consiste à calculer les heures de service réellement offertes, en soustrayant les périodes où le service est interrompu, en utilisant les données de la base des interruptions décrites dans la section 3.1.6. La formule utilisée est la suivante :

*Heures de service réelles*

$$= \sum_{\substack{\text{Jours de la} \\ \text{période} \\ \text{considérée}}} \text{Heures de service} - \sum_{\substack{\text{Interruptions} \\ \text{pendant la} \\ \text{période} \\ \text{considérée}}} \text{Durée des interruptions}$$

Cet indicateur varie de 1799 à 2257 heures, avec un écart-type de 74 heures. Sa variabilité est donc plus importante que celle des heures de services planifiées.

### Confort et commodité

Le temps de déplacement n'est pas calculable par station, et pour le métro, les données de charge à bord ne sont pas disponibles. Par conséquent, la seule mesure de confort et de commodité utilisable dans ce cas est la fiabilité. Le TCQSM propose plusieurs indicateurs de fiabilité couramment utilisés par les opérateurs de transport en commun : la ponctualité, le respect de l'intervalle, le temps d'attente excédentaire, les trajets non réalisés, ainsi que la distance parcourue entre les pannes mécaniques (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013).

Étant donné que les données d'heures de départ et d'arrivée réelles ne sont pas disponibles, les quatre premières mesures ne peuvent pas être calculées. En revanche, la distance parcourue entre les pannes mécaniques peut être déterminée à partir de la base de données des interruptions de service. Habituellement utilisée par les opérateurs de transport en commun pour évaluer la fiabilité mécanique ou électrique de leur équipement (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013), cette mesure sera adaptée pour refléter le point de vue des passagers, en raison de la disponibilité limitée des données. Pour les passagers, toute interruption, qu'elle soit due à une panne mécanique ou à toute autre cause, impacte la fiabilité. Ainsi, la mesure utilisée sera la distance parcourue entre les interruptions de service. De plus, puisque la distance parcourue et le temps sont proportionnels, la durée moyenne entre deux interruptions de service sera calculée.

*Durée moyenne entre interruptions de service*

*= Moyenne (durées entre les interruptions de service pendant la période étudiée)*

Les comportements des individus commencent à changer vers d'autres modes lorsque l'interruption dépasse 10 minutes (Lepage, 2019). Ainsi, les interruptions de moins de 10 minutes ne sont pas prises en compte dans les calculs.

Dans la base de données, le lieu d'une interruption est une station, mais comme le métro ne peut changer de directions que dans certaines stations, l'interruption au niveau d'une station affecte plusieurs stations auxquelles elles sont reliées (Dehaghani, 2023). En se basant sur ce concept, 24 blocs de stations sont établis par Dehaghani (2023), délimités par les stations où le changement de direction est possible. Une interruption du service à une station, cause l'interruption du service au

niveau de toutes les autres stations du bloc. Un tableau montrant les blocs définis par Kaveh Rezvani Dehaghani (2023) est inclus dans le Tableau A.6.1 de l'annexe A. Le temps moyen entre deux interruptions est donc calculé pour chaque station, en prenant ces éléments en compte.

#### Combinaison des mesures de disponibilité temporelle et de confort et commodité

Pour combiner les mesures de disponibilité temporelle et de fiabilité en une seule mesure de qualité de service, il est essentiel que ces deux mesures soient du même ordre de grandeur. Le temps moyen entre interruptions est normalisé en utilisant ses valeurs maximum et minimum comme suit:

$$TMEI, \text{normalisé} = \frac{TMEI - \text{Min}(TMEI)}{\text{Max}(TMEI) - \text{Min}(TMEI)}$$

Pour normaliser le temps de service réel, il est divisé par le temps de service planifié pour chaque station, résultant en un ratio de temps de service réel et planifié;

$$\text{Ratio de service réel, planifié} = \frac{\text{Temps de service réel}}{\text{Temps de service planifié}}$$

Le coefficient de corrélation de ces deux variables calculées pour les stations de métro est de 0.65, indiquant une corrélation forte. Ce constat est également étayé par l'analyse du graphique à la Figure 3.17, illustrant la variation du ratio de service réel par rapport au service planifié en fonction du temps moyen entre les interruptions de service.

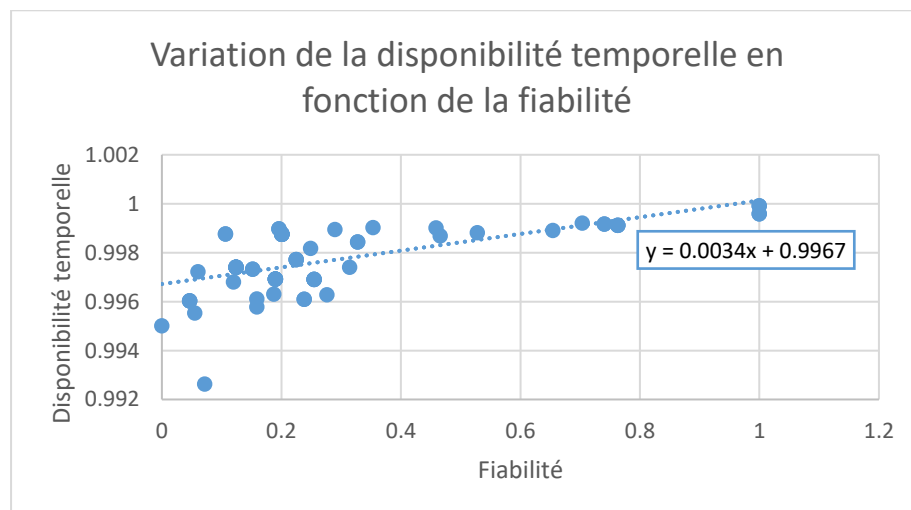


Figure 3.17 Variation de la disponibilité temporelle en fonction de la fiabilité pour le métro

Il en découle que les deux indicateurs communiquent essentiellement la même information, et que l'un d'entre eux peut être sélectionné pour représenter la qualité de service du métro. Étant équivalents en termes d'importance du point de vue de la perception du passager, l'un ou l'autre peut être choisi. Cependant, le ratio de service réel par rapport au planifié présente un avantage notable : il est une valeur comprise entre 0 et 1, qu'il n'est pas nécessaire de normaliser, ce qui permet des comparaisons dans le temps.

Cet indicateur est calculé par station et la moyenne des indicateurs de qualité des stations appartenant à la zone (en considérant une zone tampon de 100 mètres) est ensuite calculé.

## Bus

### Disponibilité temporelle

La mesure de disponibilité temporelle utilisée pour les bus est la fréquence, ou l'intervalle de service. L'intervalle moyenne en période de pointe matinale est calculé pour les jours de semaine pour la période étudiée, comme recommandé par le Transit Capacity and Quality of Service Manual (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013). Pour chaque arrêt, la moyenne est d'abord calculée par jour et puis sur la totalité des jours.

Pour les bus de la STM, les données GTFS sont utilisées pour ce calcul, et pour les bus de la STL le calcul est fait directement dans la base de données de ponctualité, car elle inclut tous les passages de bus avec leur heures planifiées.

Certains bus ne passent pas pendant les heures de pointe matinales ou ne passent pas plus qu'une fois pendant cette période, leur intervalle est considéré comme étant l'intervalle maximale de 60 minutes. De même tous les bus qui ont un intervalle supérieur à 60 minutes (la valeur maximale) sont considérés comme ayant un intervalle de 60 minutes.

### Confort et commodité

Les données disponibles simultanément pour les autobus de la STM et de la STL se limitent aux données de ponctualité des passages d'autobus, restreignant ainsi l'analyse au calcul de la fiabilité.

La majorité des agences de transport par autobus en Amérique du Nord considèrent que la mesure et le maintien de la fiabilité est une priorité. La ponctualité est la mesure de fiabilité la plus couramment reconnue et utilisée. D'autres mesures qui concernent les pourcentages d'interruption de service, le pourcentage de trajets livrés ou la distance moyenne entre les défaillances sont

d'autres mesures utilisées moins fréquemment par les opérateurs (Diab, Badami, & El-Geneidy, 2015). Typiquement la ponctualité est mesurée comme le pourcentage de voyages qui partent ou arrivent à leur arrêt dans une plage horaire prédéterminée (Diab et al., 2015).

La définition de cette plage varie d'un opérateur à un autre (Diab et al., 2015), ce qui rend cette mesure peu comparable d'un opérateur à un autre (Transportation Research Board National Academies of Sciences, 2013). Le standard utilisé pour les calculs dans le cadre de ce mémoire est défini par la Société de transport de Montréal, qui considère un voyage comme ponctuel s'il arrive jusqu'à une minute en avance ou jusqu'à trois minutes en retard par rapport à l'horaire planifié (Société de transport de Montréal, 2024).

Pour chaque arrêt, sur la période étudiée, pour les jours de semaine, le nombre de passages d'autobus est calculé, ainsi que le nombre de passages en retard. Et la ponctualité est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Ponctualité, pour un arrêt} = \frac{\text{Nombre de passages d'autobus qui sont au plus 1 minute en avance ou 3 minutes en retard}}{\text{Nombre de passages d'autobus réalisés}}$$

L'indicateur utilisé est la non-ponctualité donc 1-ponctualité, afin qu'il varie de la même manière que l'intervalle.

#### Combinaison des deux mesures

Le coefficient de corrélation entre les deux variables pour l'ensemble des stations est de 0.21, indiquant une faible corrélation. Ce constat est également illustré par le graphe à la Figure 3.18, qui montre la variation de la ponctualité en fonction de l'intervalle moyen. Ainsi, les deux mesures fournissent des informations distinctes sur la qualité de service.

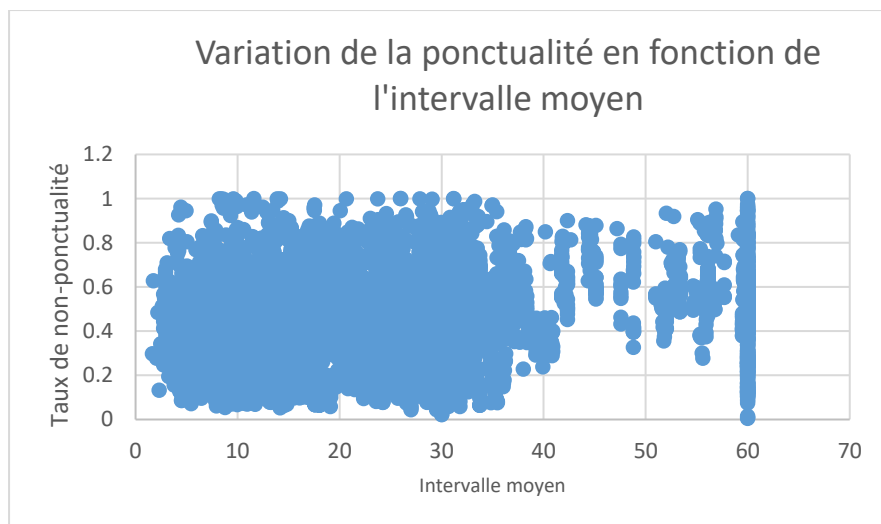


Figure 3.18 Variation de la non-ponctualité en fonction de l'intervalle moyen pour les stations de bus

Les deux options disponibles pour combiner ces deux mesures sont leur multiplication ou le calcul de leur moyenne. Pour que ces indicateurs soient comparables, ils doivent être du même ordre de grandeur. La non-ponctualité est déjà exprimée entre 0 et 1, tandis que l'intervalle moyen est divisé par 60 (sa valeur maximale) pour le ramener à une échelle de 0 à 1. Le défi réside dans la détermination de la combinaison qui reflète le mieux l'expérience du passager. Par exemple, en utilisant la multiplication, on obtient un score similaire d'environ 0.129 pour un bus ayant un intervalle de 22.3 minutes et 34.8% de non-ponctualité, et pour un intervalle de 60 minutes avec 12.9% de non-ponctualité. En revanche, en utilisant la moyenne, l'intervalle de 60 minutes avec 12.9% de retards est considéré meilleur (0.564) que l'intervalle de 22.3 minutes avec 34.8% de non-ponctualité (0.356). Inversement, en utilisant la moyenne, on obtient un score similaire d'environ 0.561 pour un bus avec un intervalle de 25.4 minutes et 69.9% de non-ponctualité, et pour un intervalle de 60 minutes avec 12.2% de non-ponctualité. Cependant, l'intervalle de 25.4 minutes avec 69.9% de non-ponctualité est jugé meilleur (0.296) que l'intervalle de 60 minutes avec 12.2% de non-ponctualité (0.122). Le graphique à la Figure 3.19 illustre la variation de la multiplication par rapport à la moyenne, montrant que la relation entre ces deux façons de combiner les indicateurs n'est pas linéaire.

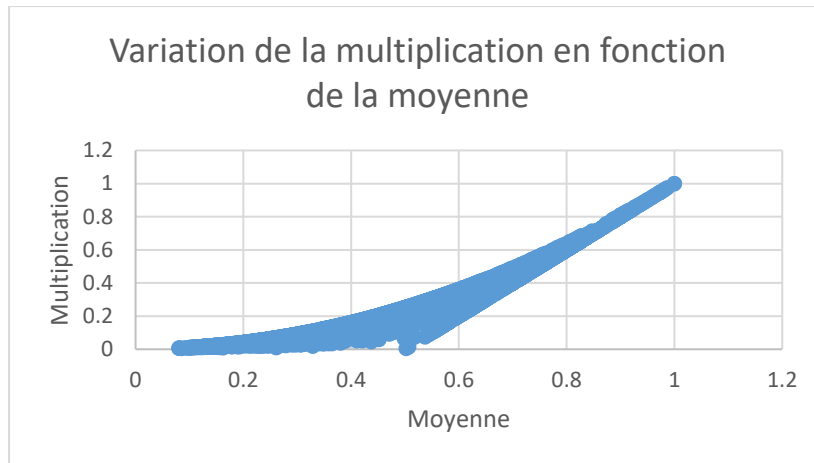


Figure 3.19 Variation de la multiplication en fonction de la moyenne

Afin de déterminer quelle combinaison est plus représentative de l'expérience des passagers, le calcul du temps d'attente engendré par les retards sont calculés, en supposant que la non-punctualité est toujours un retard de cinq minutes. Pour déterminer le temps d'attente la formule suivante est utilisée (Doras J. L., 1979):

$$E(A) = \frac{E(X)}{2} (1 + C_X^2)$$

Avec  $E(A)$  : Le temps d'attente

$E(X)$  : L'intervalle moyen

$C_X$  : Le coefficient de variation de l'intervalle de service

La moyenne et la multiplication des deux indicateurs sont ensuite tracées en fonction du temps d'attente, comme montré aux Figure 3.20 et Figure 3.21.

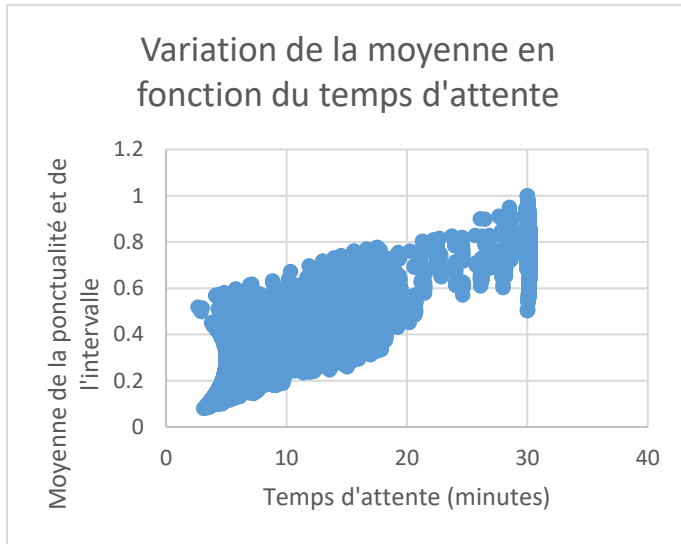


Figure 3.20 Variation de la moyenne en fonction du temps d'attente

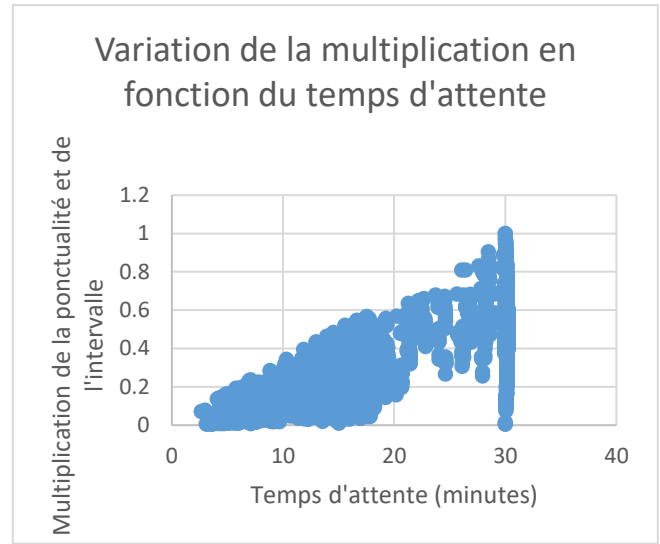


Figure 3.21 Variation de la multiplication en fonction du temps d'attente

Il est évident que pour des temps d'attente plus courts, l'indicateur obtenu par multiplication présente moins de variabilité que celui obtenu par la moyenne. Cependant, cette variabilité augmente lorsque le temps d'attente s'allonge, tandis qu'elle reste relativement constante pour la moyenne. En termes de temps d'attente, la moyenne du taux de retards et de l'intervalle moyen est plus représentative de l'expérience de l'utilisateur, puisqu'elle augmente de façon proportionnelle au temps d'attente.

Comme le calcul est une moyenne, des poids égaux sont donnés aux deux composantes de disponibilité temporelle et de fiabilité, mais cette formule peut être ajustée avec des poids différents si dans certains contextes, l'une des composantes est considérée plus importante. L'équation de la mesure de qualité de service utilisée est donc la suivante :

$$IQS, B = 1 - \left( \frac{\alpha \times (1 - \text{ponctualité}) + \beta \times \text{Intervalle moyen}}{\alpha + \beta} \right)$$

Avec  $IQS, B$  : L'indicateur de qualité de service, bus

$\alpha$  : Le poids de la composante de non-ponctualité, ici 1

$\beta$  : Le poids de la composante d'intervalle moyen, ici 1

### Train de banlieue

Comme les trains de banlieue ont des intervalles similaires à ceux des autobus, les mêmes mesures de disponibilité temporelle et de confort et commodité sont utilisés, et elles sont calculées de la même façon. Afin de combiner les deux mesures, les mêmes analyses sont réalisées. Les deux indicateurs sont très faiblement corrélés avec un coefficient de 0.26, ce qui est visible sur le graphe à la Figure 3.22.

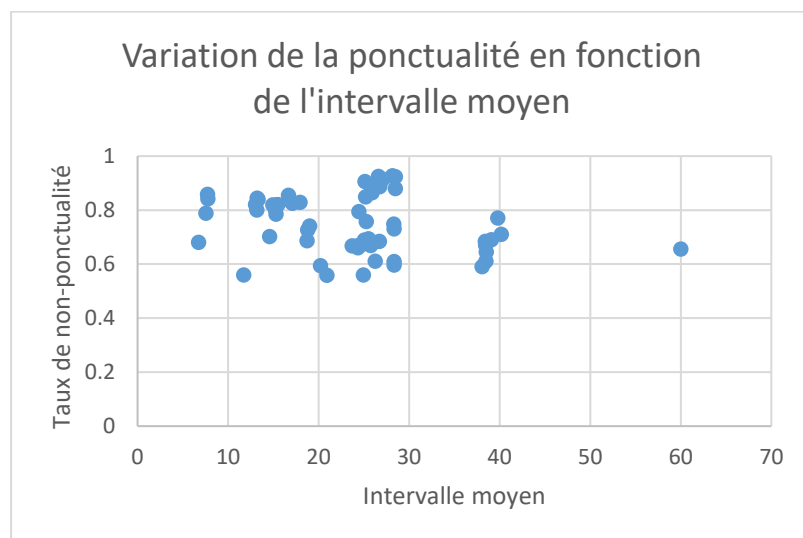


Figure 3.22 Variation de la ponctualité en fonction de l'intervalle moyen

Comme démontré dans la section précédente, la moyenne de ces deux indicateurs est plus représentative de l'expérience de l'utilisateur. L'indicateur de qualité utilisé est donc la moyenne du taux de non-ponctualité et de l'intervalle moyen normalisé, comme pour l'autobus.

De manière similaire au métro, l'indicateur de qualité de service est calculé pour chaque station. L'indicateur de qualité pour une zone donnée est déterminé comme la moyenne des indicateurs pour toutes les stations appartenant à cette zone.

### 3.2.4 Combinaison des mesures de disponibilité, d'accessibilité et de qualité de service

Pour chaque mode, trois mesures ont été établies. Pour les combiner, et obtenir un indicateur qui décrit l'offre de chaque mode, elles doivent être normalisées afin d'être toutes comprises entre 0 et 1. Les mesures déjà comprises dans cet intervalle ne seront pas modifiées, tandis que celles qui ne le sont pas seront normalisées à l'aide d'une mise à l'échelle min-max.

La formule de normalisation est la suivante (de Amorim et al., 2023):

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Le Tableau 3.10 indique quelles mesures sont normalisées.

Tableau 3.10 Spécification des mesures devant être normalisées

La mesure de :	Disponibilité	Accessibilité	Qualité de service
Automobile privée	Normalisée	Normalisée	Normalisée
Autopartage	Appartient déjà à [0,1]	Normalisée	Normalisée
Vélo privé	Normalisée	Normalisée	Appartient déjà à [0,1]
Vélopartage	Appartient déjà à [0,1]	Normalisée	Appartient déjà à [0,1]
Marche	Normalisée	Normalisée	Normalisée
Metro	Normalisée	Normalisée	Appartient déjà à [0,1]
Train	Normalisée	Normalisée	Appartient déjà à [0,1]
Bus	Normalisée	Normalisée	Appartient déjà à [0,1]

Après normalisation, la formule suivante est utilisée pour combiner les mesures:

$$I_m = \frac{\alpha_1 D_m + \alpha_2 A_m + \alpha_3 QS_m}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}$$

$I_m$  : L'indicateur global pour le mode  $m$

$D_m$  : L'indicateur de disponibilité pour le mode  $m$

$A_m$  : L'indicateur d'accessibilité pour le mode  $m$

$QS_m$  : L'indicateur de qualité de service pour le mode  $m$

$\alpha_1$  : Le poids associé à la mesure de disponibilité

$\alpha_2$  : Le poids associé à la mesure d'accessibilité

$\alpha_3$  : Le poids associé à la mesure de qualité de service

Les poids peuvent être ajustés selon l'importance que l'utilisateur veut porter à chacun des trois aspects. Dans le cadre de ce projet, ils sont considérés d'importance égale, les poids sont donc fixés à 1.

### 3.3 Division du territoire

Cette section décrit les divisions du territoire considérées ainsi que les raisons de ces choix. Elle est divisée en trois parties : le problème de l'agrégation spatiale, les sous-divisions du territoire et les méthodes de comparaison des résultats obtenus pour les différentes divisions.

#### 3.3.1 Problème d'agrégation spatiale

Le problème d'agrégation spatiale, connu sous le nom de « Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) », est un sujet d'intérêt dans plusieurs domaines, notamment dans le domaine du transport. Il est défini comme le problème survenant lors de l'agrégation spatiale des données, où le changement de taille ou de forme des divisions géographiques peut redistribuer les données, entraînant de nouveaux résultats pour les différentes zones considérées. Des observations précédemment regroupées peuvent être séparées, tandis que des points précédemment séparés peuvent être regroupés (Buzzelli, 2020).

Les chercheurs distinguent deux problèmes principaux à considérer : l'effet d'échelle et l'effet zonal. L'effet d'échelle décrit l'impact du changement du nombre de zones en lesquelles le territoire étudié est divisé. L'effet zonal décrit la variation des données et résultats obtenus lorsqu'un ensemble d'unités spatiales à une échelle donnée est recombinaé en différentes zones (Nix, 2021). L'utilisation des zones les plus petites n'est pas toujours la solution la plus appropriée, puisqu'elles sont plus variables, alors que les unités plus grandes tendent à se rapprocher des caractéristiques résumées de la moyenne régionale, réalisant un lissage des données. Cela résulte en une perte de la variabilité qui n'est pas toujours idéale (Buzzelli, 2020). Une des approches techniques utilisées pour réduire les incertitudes générées par le problème d'agrégation spatiale est l'utilisation d'échelles alternatives et de simulations d'unités spatiales en modifiant leurs échelles et limites (Buzzelli, 2020).

L'approche utilisée dans ce projet est inspirée de celle utilisée par Zhang & Kukadia (2005), qui utilisent huit systèmes de divisions dont trois sont basées sur la géographie du recensement et cinq sont des systèmes de grille arbitraires dont trois sont comparables aux divisions du recensement. (Nix, 2021) utilise une approche similaire appliquée à la région montréalaise, où ils considèrent les secteurs du recensement canadien et les aires de diffusion du recensement pour analyser l'effet d'échelle du problème d'agrégation spatiale.

Afin d'évaluer l'effet d'échelle, les divisions du territoire qui sont considérées dans le cadre de ce projet sont donc les secteurs de recensement ainsi que les aires de diffusion du recensement de l'année 2016. De plus, les secteurs municipaux utilisés dans le cadre de l'enquête Origine-Destination sont utilisés comme troisième division, puisqu'ils sont plus grands que les secteurs de recensement, mais aussi pour garantir la compatibilité des résultats de cette étude avec ceux de l'enquête Origine-Destination 2018.

L'effet zonal est évalué en utilisant trois systèmes de grilles qui couvrent la zone étudiée et sont composés du même nombre de division que les aires de diffusion, les secteurs de recensement et les secteurs municipaux. Le Tableau 3.11 présente les caractéristiques de ces grilles.

Tableau 3.11 Caractéristiques des grilles équivalentes aux divisions

Grille	Nombre de polygones	Dimension du côté
Grille ayant le même nombre de divisions que les aires de diffusion	3866	468 mètres
Grille ayant le même nombre de divisions que les secteurs de recensement	623	1200 mètres
Grille ayant le même nombre de divisions que les secteurs municipaux	49	4750 mètres

Les six divisions considérées sont montrées aux Figure 3.23, Figure 3.24, Figure 3.25, Figure 3.26, Figure 3.27 et Figure 3.28.

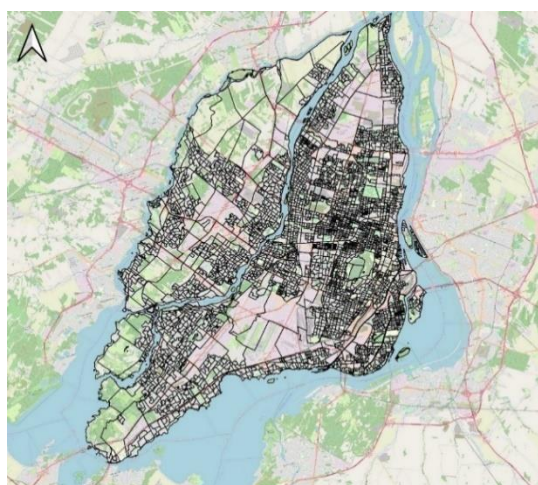


Figure 3.23 Division du territoire selon les aires de diffusion

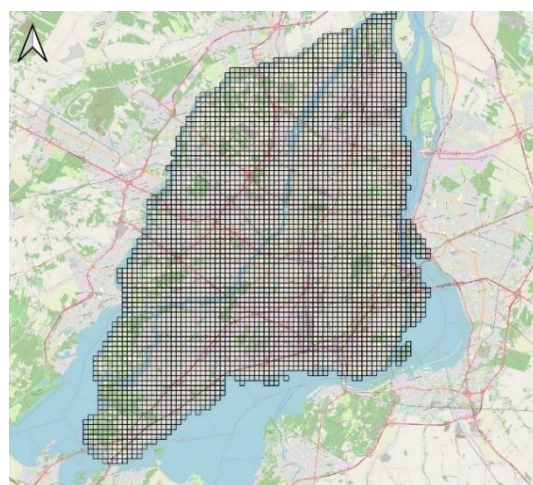


Figure 3.24 Division du territoire selon la grille équivalente aux aires de diffusion

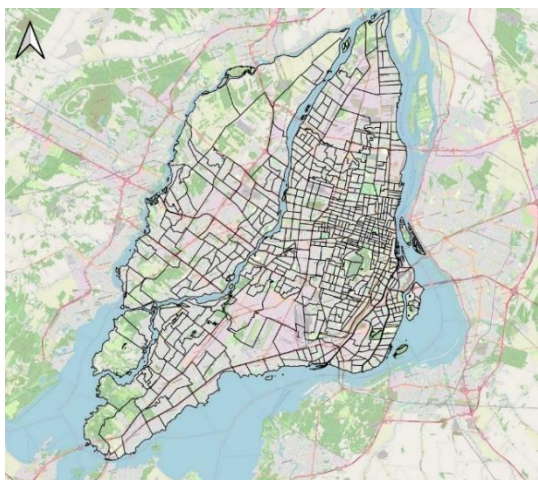


Figure 3.25 Division du territoire selon les secteurs du recensement

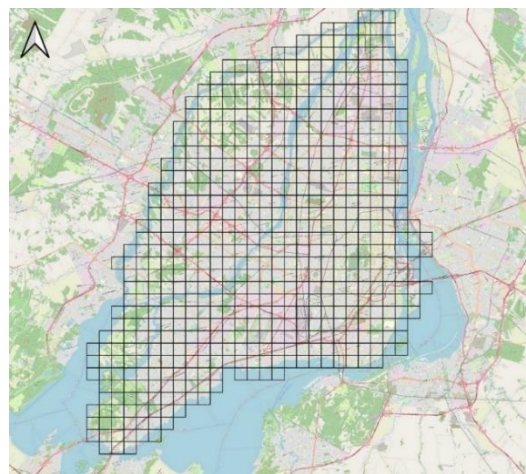


Figure 3.26 Division du territoire selon la grille équivalente aux secteurs du recensement

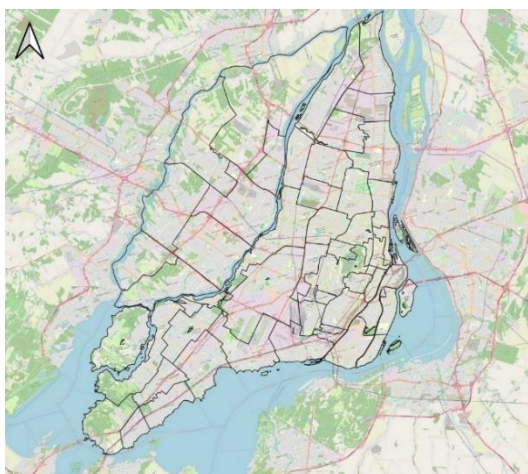


Figure 3.27 Division du territoire selon les secteurs municipaux

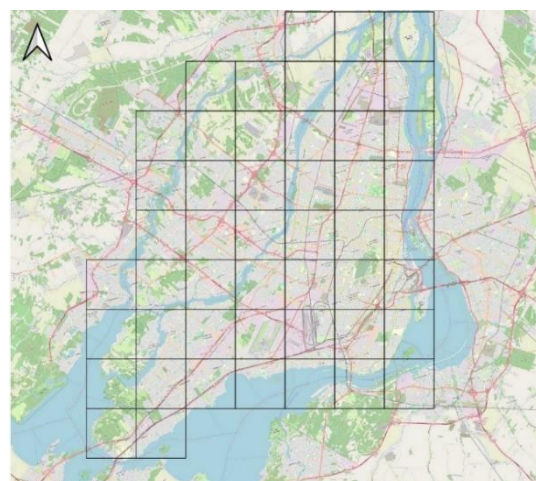


Figure 3.28 Division du territoire selon la grille équivalente aux secteurs municipaux

### 3.3.2 Sous-divisions du territoire

Certaines mesures nécessitent des calculs au niveaux de sous-divisions, qui sont décrites dans cette section. Les sous-divisions pour les aires de diffusion, les secteurs de recensement et les secteurs municipaux sont les îlots de diffusion, qui sont la plus petite division du recensement. Pour créer des sous-divisions équivalentes pour les grilles, le nombre de polygones devrait se rapprocher autant que possible du nombre d'îlots de diffusion, tout en respectant la contrainte de s'intégrer dans la division principale. Le Tableau 3.12 présente les caractéristiques des sous-divisions.

Tableau 3.12 Caractéristiques des grilles de sous-divisions

Sous-divisions	Nombre de divisions	Dimension du côté
Ilots de diffusion	17544	-
Grille de sous-division de la grille équivalente aux secteurs municipaux	17689	250 mètres
Grille de sous-division de la grille équivalente aux secteurs de recensement	22800	240 mètres
Grille de sous-division de la grille équivalente aux aires de diffusion	15464	234 mètres

### 3.3.3 Méthodes de comparaison

L'objectif de l'utilisation de plusieurs divisions est d'évaluer la stabilité des résultats face à l'effet d'échelle et à l'impact zonal du problème d'agrégation spatiale. Pour ce faire, la distribution des indicateurs pour les différents modes est étudiée. Les tests statistiques non paramétriques utilisés pour comparer ces distributions sont le test U de Mann-Whitney et le test de Kolmogorov-Smirnov. Ces deux tests permettent de comparer les distributions de deux groupes indépendants sans imposer de condition sur la forme de ces distributions (Sheskin, 2003).

Le test de Kolmogorov-Smirnov pour deux échantillons indépendants détecte toute différence de distribution, qu'elle soit liée à la localisation/tendance centrale, à la dispersion/variabilité, à l'asymétrie ou au kurtosis. Ce test compare les distributions cumulatives de deux échantillons indépendants. Si les deux échantillons proviennent de la même population, leurs distributions cumulatives devraient être identiques ou très similaires. L'hypothèse nulle affirme que la distribution des données de l'échantillon 1 est similaire à celle de l'échantillon 2 (Sheskin, 2003). Mann-Whitney U évalue si deux échantillons indépendants représentent des populations avec des valeurs médianes différentes ou des distributions distinctes dans les deux populations (Sheskin, 2003).

L'hypothèse nulle de ces deux tests est « les distributions sont égales ». Si la valeur p trouvée pour chacun des tests est inférieure à 0,05, l'hypothèse nulle est rejetée, indiquant des différences significatives entre les deux distributions. En revanche, si la valeur p est supérieure à 0,05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle, ce qui suggère que les distributions ne sont pas significativement différentes selon ces deux tests statistiques.

Les distributions sont ensuite comparées graphiquement grâce aux diagrammes quantile-quantile et de densité. Le diagramme quantile-quantile est un graphique des quantiles du premier ensemble de données par rapport aux quantiles du deuxième ensemble de données. Une ligne de référence à 45 degrés est également tracée. Si les deux ensembles proviennent d'une population avec la même distribution, les points devraient tomber approximativement le long de cette ligne de référence (Guthrie, 2020). Un graphique de densité illustre la répartition des données sur un intervalle continu. Cette méthode, qui est une variante de l'histogramme, utilise le lissage par noyau pour tracer les valeurs, permettant ainsi une représentation plus fluide des distributions en réduisant le bruit. Les pics sur un graphique de densité indiquent les zones où les valeurs sont concentrées dans l'intervalle. L'un des avantages des graphiques de densité par rapport aux histogrammes réside dans leur capacité à mieux révéler la forme de la distribution, car ils ne dépendent pas du nombre de classes utilisées (Data Viz Catalogue, 2024).

### **3.4 Caractérisation de la multimodalité**

L'offre de chaque mode est mesurée par un indicateur établi. Chaque zone considérée a huit valeurs associées, variant de 0 à 1. La somme pourrait être faite pour obtenir un « score de multimodalité », mais les indicateurs ne sont pas directement comparables pour tous les modes et cela n'aiderait pas nécessairement à mesurer la diversité de l'offre. Par exemple, une zone avec un très bon score pour l'auto et des scores mauvais pour le reste serait équivalente à une zone avec plusieurs modes ayant des scores moyens. Il est donc nécessaire d'évaluer tous les indicateurs.

Théoriquement, une zone à multimodalité parfaite a un score de 1 pour tous les modes, tandis qu'une zone à multimodalité nulle a un score de 0 pour tous les modes. Une méthode de classement des zones selon leur niveau de multimodalité est établie afin de pouvoir comparer toutes les zones entre ces deux extrêmes. Le niveau de multimodalité d'une zone n'est donc pas absolu, il dépend des zones auxquelles il est comparé. Pour cela, une segmentation des zones sera effectuée sur la base des huit indicateurs de l'offre des différents modes, résultant en des groupes de zones qui ont une offre de transport similaire. Les groupes créés seront comparés en fonction de la valeur médiane de chaque indicateur.

Après avoir établi les groupes de zones, il faut déterminer pour chaque groupe et pour chaque mode si la valeur médiane de l'indicateur représente un score bas, moyen ou élevé pour le mode.

Un groupe est considéré comme ayant un score « bas » pour un mode si celui-ci est la pire valeur (la plus proche de 0) de tous les groupes ou si sa valeur est plus proche de la pire valeur que de celles des autres groupes. Le score d'un mode pour un groupe est considéré « élevé » si c'est la meilleure valeur (la plus proche de 1) ou s'il est plus proche de la meilleure valeur que des médianes des autres groupes. Les scores sont considérés comme moyens lorsqu'ils se situent entre ces deux extrêmes. De plus, si le troisième quartile est nul, il est considéré que le groupe de zones n'est pas desservi par le mode.

Ayant établi le niveau de score pour chaque mode dans chaque groupe, la première comparaison à faire est celle du nombre total de modes qui desservent le groupe de zones, qui est la somme du nombre de modes dans chaque catégorie d'indicateurs. Plus ce nombre est grand, plus la zone est considérée multimodale. Ensuite pour différencier les groupes ayant le même nombre de modes, le nombre de modes ayant un score élevé est utilisé. Plus ce nombre est grand plus le groupe de zones est considéré comme multimodal. Si deux groupes ont le même nombre total de modes et de modes à scores élevés, le groupe ayant le plus grand nombre de modes avec un score moyen est celui dont les zones sont considérées plus multimodales.

Cela résulte en un classement des groupes de zones des moins au plus multimodales. Cette méthode permet d'abord de prendre en compte le nombre de modes disponibles dans une zone, comme la définition de la multimodalité est un système de transport qui fournit plusieurs modes (Groth & Kuhnimhof, 2021). Elle permet ensuite de différencier entre le niveau de l'offre pour les zones où le même nombre de modes existent.

Les catégories de scores (bas, moyen, élevé) permettent d'avoir assez de détails pour les analyses dans le cadre de ce projet mais si un nombre plus important de groupes est utilisé, des catégories de scores pourraient être rajoutées, permettant des distinctions plus importantes.

## CHAPITRE 4 RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats du projet et est divisé en deux parties : la première partie montre la distribution des indicateurs de différents modes pour divers systèmes de divisions et la deuxième présente l'évaluation de la multimodalité des zones.

### 4.1 Distributions des indicateurs par système de division

Cette section décrit la distribution des indicateurs globaux pour les différents modes et divisions. Pour chaque indicateur et division, une boîte à moustache et un tableau montrant les valeurs minimum, maximum, moyenne et l'écart-type sont présentés. Une carte choroplèthe montrant la distribution spatiale de chaque indicateur et division est incluse dans l'Annexe B aux figures B.1 à B.48.

#### 4.1.1 Automobile privée

Le Tableau 4.1 montre les statistiques descriptives de l'indicateur global qui décrit l'offre de transport relative à l'automobile privée.

Tableau 4.1 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour l'automobile privée

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.047	0.020	0.153	0.082	0.062	0.089
Maximum	0.802	0.655	0.756	0.750	0.762	0.674
Moyenne	0.495	0.363	0.523	0.459	0.552	0.468
Écart-type	0.039	0.139	0.068	0.151	0.116	0.172
Coefficient de variation	0.079	0.383	0.130	0.329	0.210	0.368

Le diagramme en boîte des indicateurs pour l'automobile privée est présenté à la Figure 4.1

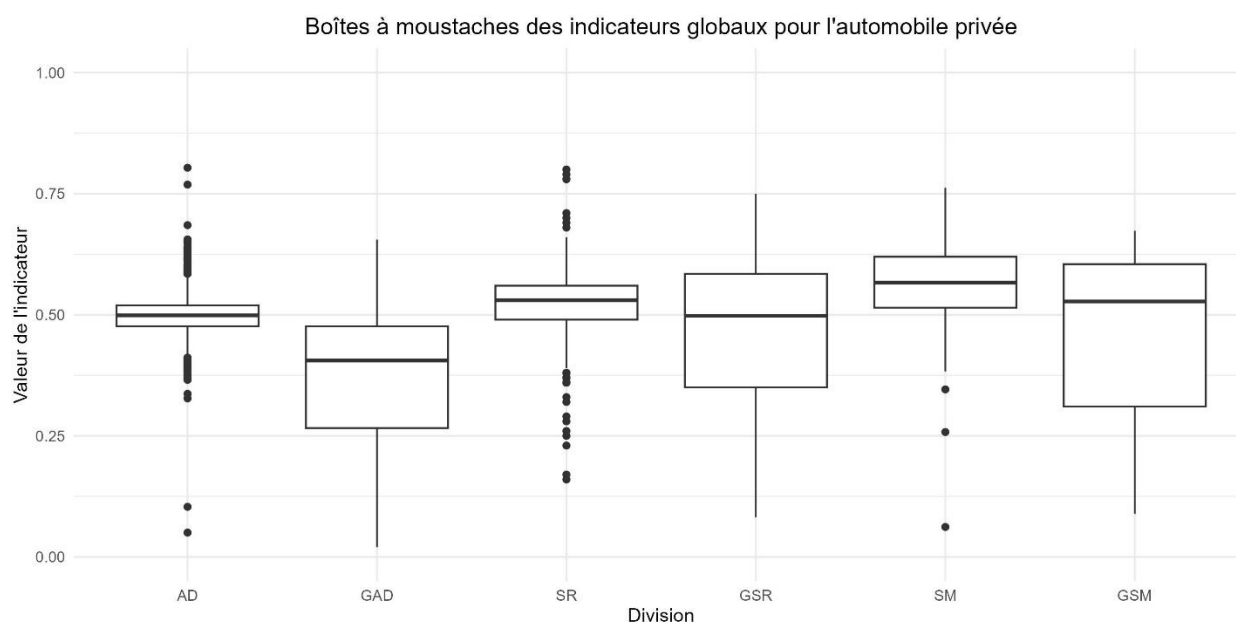


Figure 4.1 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour l'automobile privée

A partir de ces deux éléments ressortent les constats suivants :

- Les valeurs les plus petites pour le minimum, le maximum, la médiane et la moyenne sont celles de la grille équivalente aux aires de diffusion.
- Les secteurs de recensement ont la valeur la plus élevée pour le minimum et la moyenne.
- Le coefficient de variation montre qu'il y a plus de variation pour les grilles que les autres divisions et que pour les divisions de recensement et municipales la variation augmente avec la taille des divisions.
- Cela est confirmé par l'observation du graphe qui montre des variations plus importantes pour les grilles que pour les divisions de recensement avec des valeurs généralement moins élevées.

### 4.1.2 Autopartage

Le Tableau 4.2 montre les statistiques descriptives de l'indicateur global qui décrit l'offre de transport relative à l'autopartage.

Tableau 4.2 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour l'autopartage

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.127	0.082	0.122	0.067	0.083	0.058
Maximum	0.867	0.811	0.828	0.694	0.633	0.769
Moyenne	0.595	0.412	0.543	0.450	0.427	0.428
Écart-type	0.130	0.148	0.118	0.151	0.168	0.182
Coefficient de variation	0.218	0.359	0.217	0.336	0.393	0.425

Le diagramme en boîte des indicateurs pour l'autopartage est présenté à la Figure 4.2.

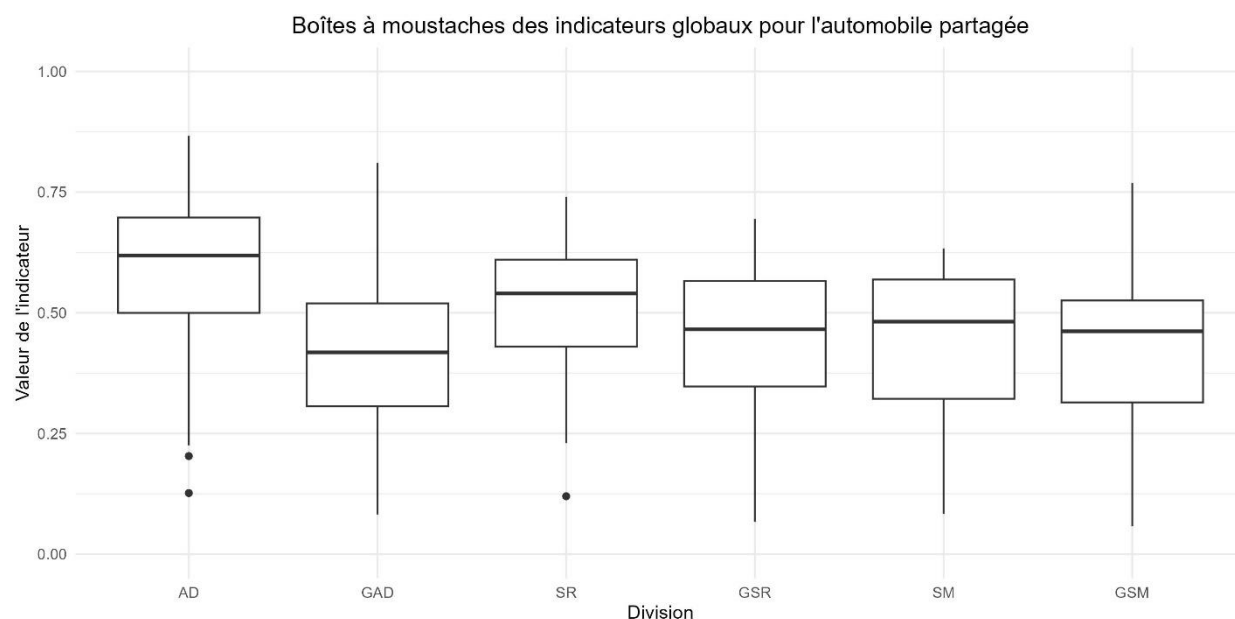


Figure 4.2 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour l'autopartage

Ces deux éléments permettent de voir que :

- Les aires de diffusion présentent les minimum, maximum, médiane et moyenne les plus grands.
- Les valeurs les plus petites pour le minimum, la médiane et la moyenne sont pour la grille équivalente aux aires de diffusion.

- Plus les divisions sont grandes, plus les valeurs médianes se rapprochent entre la division et sa grille équivalente, alors que les médianes des divisions restent supérieures à celle des grilles équivalentes.
- Le coefficient de variation ainsi que le graphe montrent que les valeurs varient respectivement plus pour les grilles que pour les divisions auxquelles elles sont équivalentes.

### 4.1.3 Vélo privé

Le Tableau 4.3 montre les statistiques descriptives de l'indicateur globale qui décrit l'offre de transport relative au vélo privé.

Tableau 4.3 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le vélo privé

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.170	0.083	0.109	0.130	0.252	0.167
Maximum	0.694	0.612	0.639	0.657	0.574	0.568
Moyenne	0.496	0.224	0.417	0.466	0.453	0.310
Écart-type	0.090	0.093	0.087	0.077	0.076	0.110
Coefficient de variation	0.181	0.415	0.209	0.165	0.168	0.355

Le diagramme en boîte des indicateurs pour le vélo privé est présenté à la Figure 4.3.

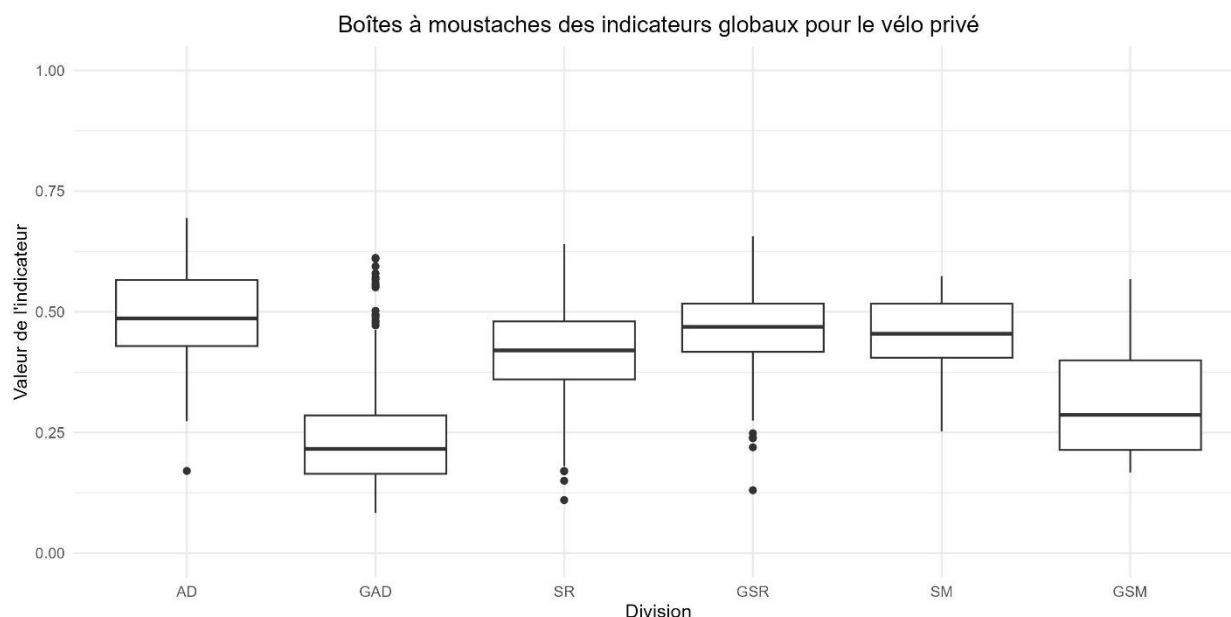


Figure 4.3 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le vélo privé

L'observation de la Figure 4.3 et l'analyse des valeurs du Tableau 4.3 permet de remarquer que :

- Contrairement aux deux modes précédents, il n'y a pas de tendances similaires en comparant les divisions et leurs grilles : la médiane des aires de diffusion est supérieure à celle de sa grille équivalente, celle des secteurs de recensement est inférieure à celle de sa grille équivalente et celle des secteurs municipaux est supérieure à celle de sa grille équivalente. L'écart entre les médianes ne varie pas de la même manière que la taille des divisions, en effet il est le plus important pour les aires de diffusion et le moins important pour les secteurs de recensement.
- Pour les divisions de recensement et municipales la variation augmente avec la taille des divisions.
- La grille équivalente aux aires de diffusion a les valeurs minimum, moyenne et médiane les plus petites et la grille équivalente aux secteurs municipaux a la valeur maximale la plus petite.
- Le coefficient de variation est la plus petit pour la grille équivalente aux secteurs municipaux et le plus grand pour grille équivalente aux aires de diffusion.

### 4.1.4 Vélopartage

Le Tableau 4.4 montre les statistiques descriptives de l'indicateur global qui décrit l'offre de transport relative au vélopartage.

Tableau 4.4 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le vélopartage

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.381	0.163	0.285	0.293	0.525	0.535
Maximum	1.000	0.972	0.982	0.925	0.904	0.818
Moyenne	0.811	0.619	0.747	0.691	0.730	0.669
Écart-type	0.121	0.160	0.122	0.134	0.133	0.094
Coefficient de variation	0.149	0.258	0.163	0.194	0.182	0.141

Le diagramme en boîte des indicateurs pour le vélopartage est présenté à la Figure 4.4.

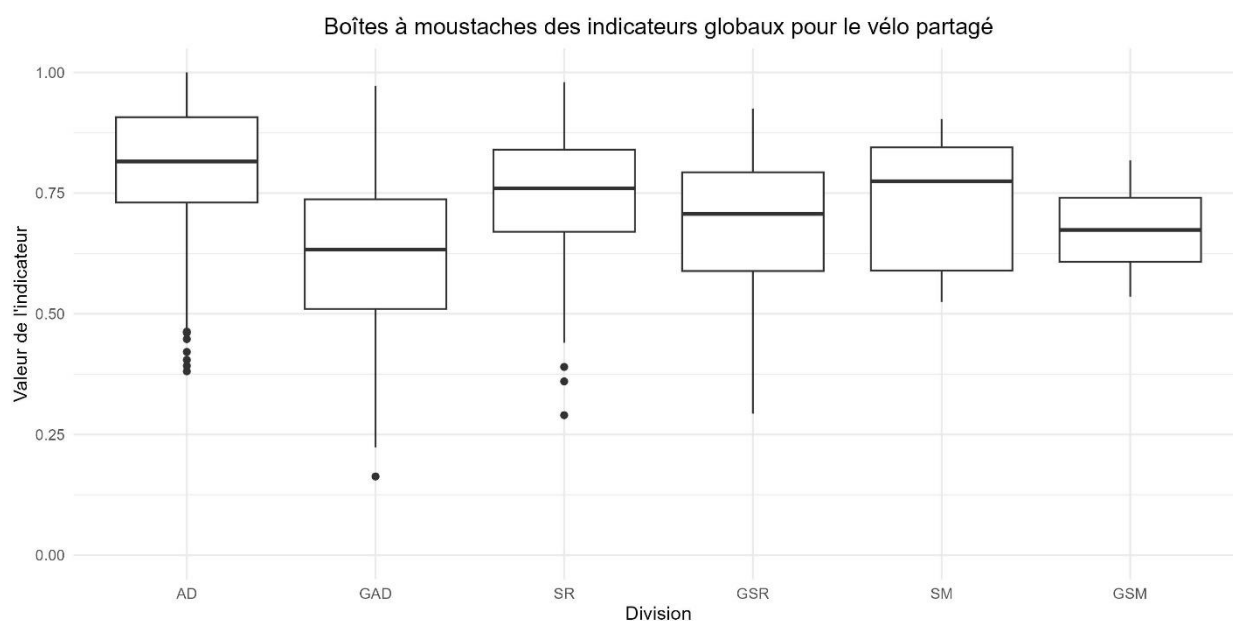


Figure 4.4 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le vélopartage

L'analyse de ces deux éléments montre que :

- Les moyennes et médianes des grilles équivalentes sont toutes inférieures à celles des autres divisions.
- Pour les divisions de recensement et municipales la variation augmente avec la taille des divisions.
- L'indicateur atteint la valeur maximale théorique de 1 pour les aires de diffusion.
- La grille équivalente aux aires de diffusion a les valeurs les plus petites pour le minimum, la moyenne et la médiane mais le coefficient de variation est le plus élevé.
- La grille équivalente aux secteurs municipaux a le coefficient de variation le plus petit, la valeur maximale la moins élevée et la valeur minimale la plus élevée.

#### 4.1.5 Marche

Le Tableau 4.5 montre les statistiques descriptives de l'indicateur global qui décrit l'offre de transport relative à la marche.

Tableau 4.5 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour la marche

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.041	0.013	0.033	0.008	0.015	0.159
Maximum	0.776	0.756	0.952	0.974	0.992	0.667
Moyenne	0.522	0.364	0.578	0.440	0.544	0.330
Écart-type	0.096	0.178	0.140	0.208	0.197	0.123
Coefficient de variation	0.184	0.489	0.242	0.473	0.362	0.373

Le diagramme en boîte des indicateurs pour la marche est présenté à la Figure 4.5.

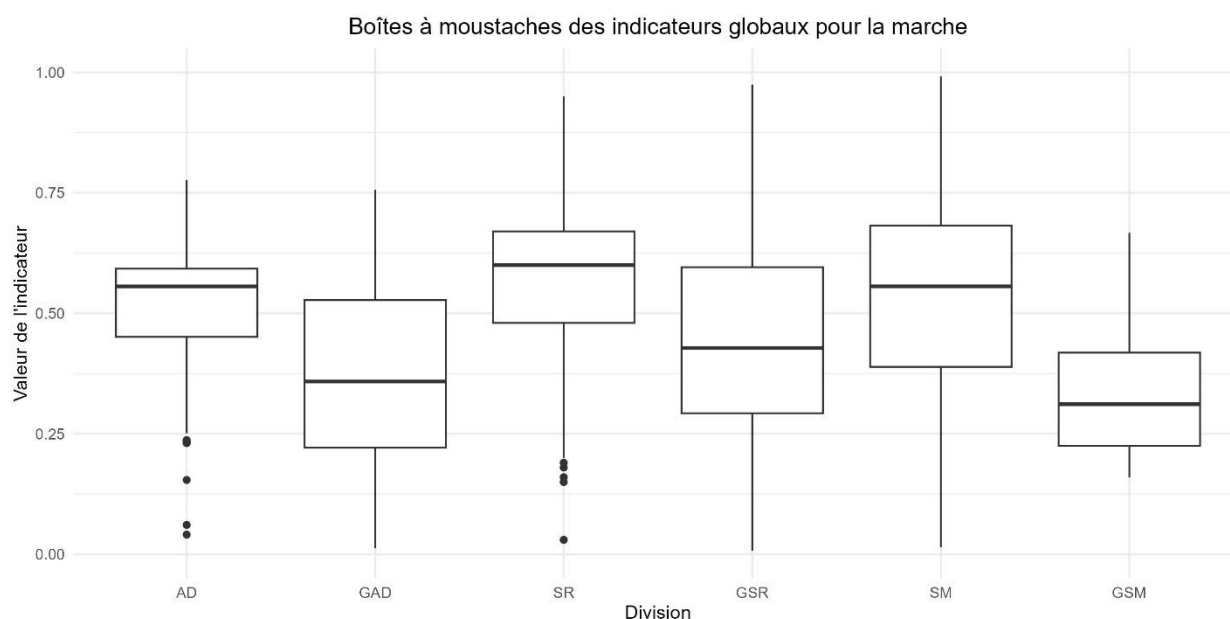


Figure 4.5 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour la marche

La Figure 4.5 et le Tableau 4.5 permettent d'observer que :

- La grille équivalente aux secteurs municipaux a les valeurs maximum, moyenne et médiane les plus faibles et la valeur minimum la plus élevée.
- Les valeurs moyenne et médiane des grilles sont inférieures à celles des divisions de recensement et municipales.
- Le coefficient de variation est moins important pour les divisions de recensement et municipales que pour les grilles équivalentes et pour les divisions de recensement et municipales la variation augmente avec la taille des divisions.
- La variation des valeurs et les statistiques descriptives ne semblent pas évoluer de la même manière quand la taille des divisions augmente.

#### 4.1.6 Métro

Le Tableau 4.6 ci-dessous montre les statistiques descriptives de l'indicateur globale qui décrit l'offre de transport relative au métro.

Tableau 4.6 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le métro

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.338	0.321	0.424	0.327	0.331	0.328
Maximum	0.902	0.757	0.903	0.910	0.984	0.958
Moyenne	0.557	0.413	0.651	0.509	0.563	0.578
Écart-type	0.094	0.101	0.070	0.130	0.158	0.216
Coefficient de variation	0.169	0.245	0.108	0.255	0.281	0.374

Le diagramme en boîte des indicateurs pour le métro est présenté à la Figure 4.6.

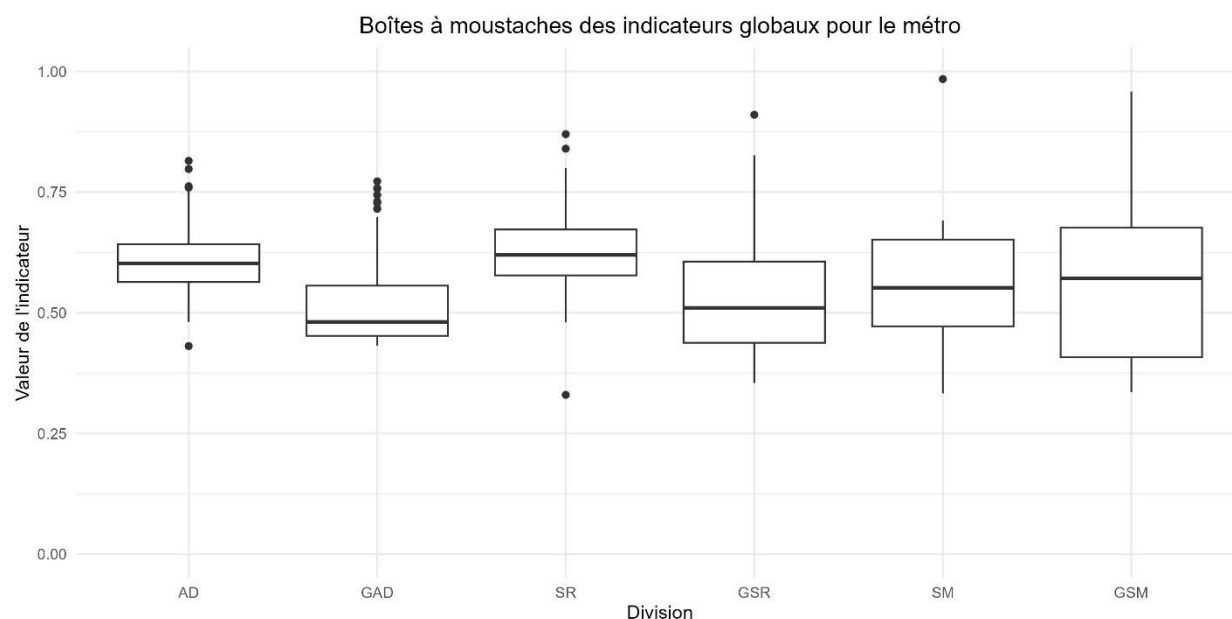


Figure 4.6 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le métro

Ces deux éléments permettent de tirer plusieurs constats :

- Les valeurs médianes de l'indicateur sont très différentes pour les aires de diffusion et leur grille équivalente, de même que pour les secteurs de recensement mais les valeurs sont assez similaires pour les secteurs municipaux et la grille équivalente à ces secteurs.

- Les valeurs varient moins pour les divisions de recensement et municipales que pour leurs grilles équivalentes.
- La grille équivalente aux aires de diffusion a les minimum, maximum, moyenne et médiane les plus petits.
- La variation de la valeur de l'indicateur augmente avec la taille des divisions pour les grilles.

#### 4.1.7 Train de banlieue

Le Tableau 4.7 montre les statistiques descriptives de l'indicateur globale qui décrit l'offre de transport relative au train de banlieue.

Tableau 4.7 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le train de banlieue

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.200	0.115	0.349	0.120	0.224	0.129
Maximum	0.743	0.812	0.794	0.603	0.633	0.824
Moyenne	0.407	0.255	0.457	0.293	0.405	0.339
Écart-type	0.095	0.136	0.073	0.109	0.100	0.143
Coefficient de variation	0.233	0.533	0.160	0.372	0.247	0.422

Le diagramme en boîte des indicateurs pour le train de banlieue est présenté à la Figure 4.7.

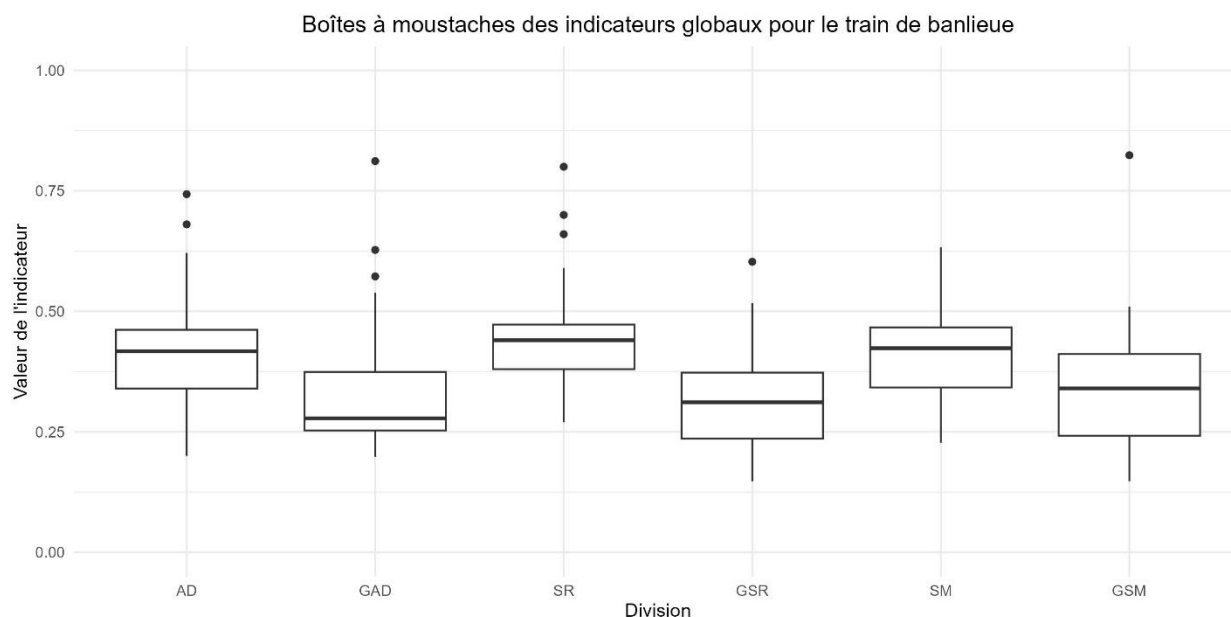


Figure 4.7 Diagramme en boîte de l'indicateur global pour le train de banlieue

Le diagramme (Figure 4.7) et statistiques descriptives (Tableau 4.7) montrent que :

- La grille équivalente aux aires de diffusion a les valeurs médiane, moyenne et minimale les plus petites.
- Les secteurs de recensement ont les valeurs médiane, moyenne et minimale les plus grandes.
- Les valeurs minimales, moyennes et médianes des grilles équivalentes sont inférieures à celles des divisions du recensement et municipales.
- Le coefficient de variation des divisions du recensement et municipales est inférieur à celui des grilles équivalentes.
- Pour les divisions de recensement et municipales la variation diminue quand la taille des divisions augmente.

#### 4.1.8 Autobus

Le Tableau 4.8 ci-dessous montre les statistiques descriptives de l'indicateur globale qui décrit l'offre de transport relative au bus.

Tableau 4.8 Statistiques descriptives de l'indicateur global pour le bus

	Aires de diffusion	Grille équivalente aux aires de diffusion (GAD)	Secteurs de recensement	Grille équivalente aux secteurs de recensement (GSR)	Secteurs municipaux	Grille équivalente aux secteurs municipaux (GSM)
Minimum	0.234	0.060	0.212	0.045	0.226	0.101
Maximum	0.840	0.665	0.799	0.824	0.844	0.826
Moyenne	0.484	0.355	0.514	0.442	0.560	0.452
Écart-type	0.049	0.103	0.065	0.134	0.120	0.178
Coefficient de variation	0.101	0.290	0.126	0.303	0.214	0.394

Le diagramme en boîte des indicateurs pour le bus est présenté à la Figure 4.8.

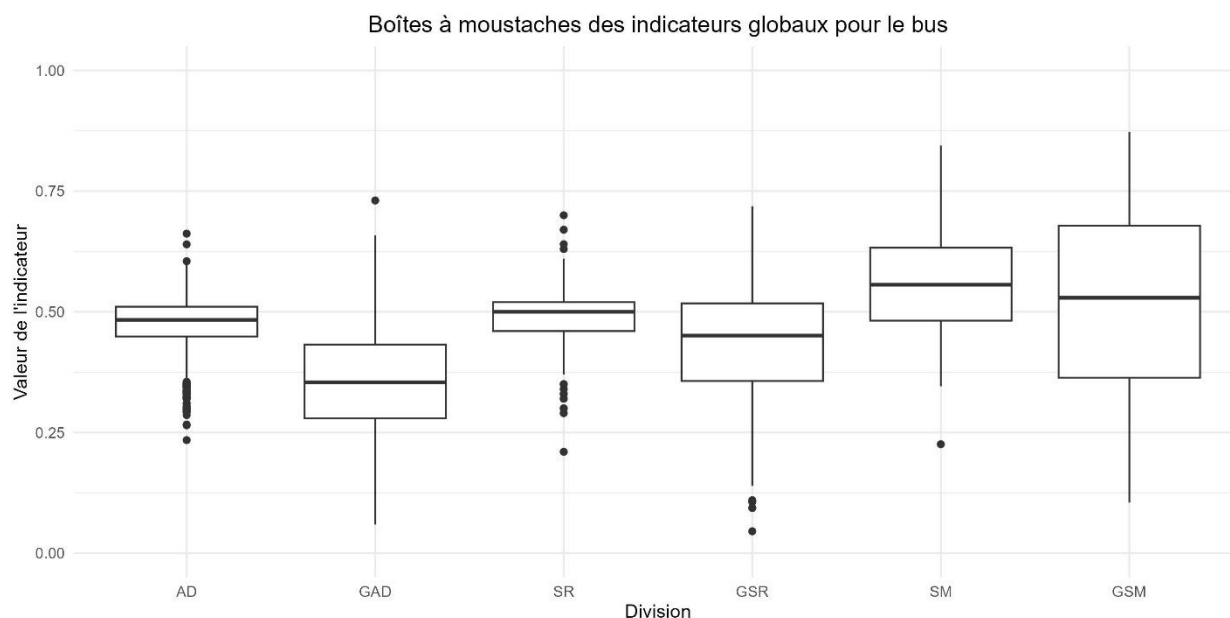


Figure 4.8 Diagramme en boîte des indicateurs globaux pour le bus

Les statistiques descriptives (Tableau 4.8) et le diagramme (Figure 4.8) permettent de voir que :

- Le coefficient de variation est plus élevé pour les grilles que pour les divisions et au sein de chaque groupe il augmente avec la taille des divisions.
- Les valeurs minimale, moyenne et médiane des grilles équivalentes sont inférieurs à celles des divisions de recensement et municipales.

- Les valeurs moyenne et médianes est plus élevée quand les divisions sont plus grandes pour les deux types de divisions.
- La grille équivalente aux aires de diffusion a les valeurs maximums, de moyenne et de médiane les plus faibles.

#### **4.1.9 Constats sur tous les modes**

Les mêmes tendances ne se présentent pas pour tous les modes, mais certains éléments sont communs à plusieurs d'entre eux.

Pour tous les modes sauf la marche, la grille équivalente aux aires de diffusion présente les valeurs moyennes et médianes les plus faibles. Même pour la marche, elle présente les deuxième plus petite valeurs pour la moyenne et la médiane. Pour le train, le métro, le vélo et l'automobile privés et partagés, elle a aussi la valeur minimale la plus faible, et la valeur maximale la plus faible pour l'automobile privée et partagée, le métro et le bus.

La grille équivalente aux aires de diffusion est la division qui présente les plus petites divisions de taille constante à travers le territoire. En conséquence, il y a un grand nombre de ces divisions qui ont des scores nuls ou bas pour les différents modes puisqu'elles sont dans des zones périphériques qui sont faiblement ou pas habitées, et qui sont donc mal desservi par les différents modes. Cela est accentué par le fait que ces divisions ne respectent pas les limites urbaines habituelles du territoire. Pour les autres grilles les indicateurs sont lissés et ont donc des valeurs moins extrêmes en comparaison. Et les aires de diffusion sont plus grandes dans les zones où il y a moins de personnes et donc moins de service, il y en a donc moins de zones avec des scores bas que de divisions de la grille.

Pour tous les modes sauf le vélo privé et partagé, il y a plus de variation dans les valeurs des indicateurs pour les grilles que pour les aires de diffusion, les secteurs de recensement et les secteurs municipaux. Et pour tous les modes sauf le métro et le vélo privé, les divisions de recensement et municipales ont des médianes et moyennes supérieurs aux grilles qui leur sont équivalentes, respectivement.

Les valeurs plus élevées pour les divisions est expliqué par le fait que leurs zones sont plus grandes dans les territoires moins peuplés et plus petites dans les territoires densément peuplés, résultant en une sur-représentation des zones densément peuplée qui sont mieux desservis par les différents

modes et ont des valeurs plus élevées pour les indicateurs comme il sera démontré dans la section suivante). Alors que toutes les parties du territoire sont comptées de manière égale avec les grilles.

Pour le vélo privé et partagé, le train et la marche, la grille équivalente aux aires de diffusion a le coefficient de variation le plus élevé. Pour l'automobile privée et partagée, le métro et le bus, c'est la grille équivalente aux secteurs municipaux qui varie le plus.

Il est logique que les indicateurs soient très variables pour les zones de la grille équivalente aux aires de diffusion à cause de leur taille, qui implique une spécificité importante et très peu de lissage. La grande variation pour la grille équivalente aux secteurs municipaux s'explique par le fait qu'en raison de leur taille, plusieurs zones contiennent des parties qui sont hors du territoire étudié, où l'offre n'est pas considérée.

## **4.2 Analyse de la multimodalité des zones**

Afin d'avoir une image globale de la multimodalité des différentes zones, selon les indicateurs développés par mode, une typologie des zones selon leur multimodalité est développée. Cette analyse est faite pour les six divisions étudiées, avec une analyse approfondie des classes de zones pour les secteurs de recensement.

Dans le premier chapitre de sa thèse, Roth (2016) teste plusieurs algorithmes de classification pour classer des secteurs du recensement américain afin de prédire les déplacements. Les six algorithmes qu'il considère sont k-moyennes, k-médianes, partitionnement autour des médoïdes (PAM), classification ascendante hiérarchique et forêt d'arbres décisionnels. Il trouve que les résultats les plus interprétables et en ligne avec les attentes de la recherche sont obtenus avec les algorithmes de k-moyennes et k-médianes lorsque les points de départ sont soigneusement choisis. Le problème de ces algorithmes est qu'ils ne sont pas stables et reproductibles si les points de départ ne sont pas fixés. L'utilisation des forêts d'arbres décisionnels et des partitionnements autour des médoïdes sont très computationnellement intensives et ne produisent pas de meilleurs résultats que plusieurs des autres algorithmes. De plus, l'algorithme de classification hiérarchique produit de bons résultats, mais qui sont moins interprétables que ceux obtenus par k-moyenne (Roth, 2016).

Il définit aussi trois critères d'une bonne classification : un nombre gérable de groupes, modérément stable et un ensemble de groupes avec une différenciation suffisante.

Le Federal Highway Administration (2017) a créé sept typologies de secteurs de recensement américains distincts en utilisant un algorithme hiérarchique. Les quartiers ont été classés en fonction de la part du territoire urbanisée et du système de transport environnant, en utilisant des variables fournissant des informations sur les emplois, les densités de logements et d'emplois, les densités d'intersections, l'offre de transports en commun et les types de développements.

En se basant sur ces deux études, le choix d'algorithme pour la classification est donc une classification hiérarchique ascendante, comme c'est un algorithme qui permet d'avoir de bons résultats, sans le risque de choisir de mauvais points de départ. L'utilisation de l'algorithme k-moyennes avec comme point de départ le centre des classes obtenues avec la classification hiérarchique est testé et donne des groupes moins bien définis.

Roth (2016) teste aussi deux méthodes de préparation des données pour réduire la colinéarité entre les variables de classification dont l'analyse en composantes principales, qui permet de générer de nouvelles variables à partir de la base de données initiale. L'auteur trouve que les résultats les plus interprétables et en accord avec les attentes du projet sont ceux obtenus avec les données non-traitées.

Dans cette analyse, une segmentation sera réalisée en se basant sur les données non-traitées et une base de données obtenus de l'analyse en composantes principales.

La base de données non-traitée est la suivante : huit valeurs (les huit indicateurs, un pour chaque mode) sont associées à chaque zone. Un extrait de la base de données utilisée pour la segmentation est montré dans le Tableau 4.9.

Tableau 4.9 Extrait de la base de données utilisée pour la classification des zones

<b>ID_d vision</b>	<b>Auto_In dicateur</b>	<b>Communauto _Indicateur</b>	<b>Velo_In dicateur</b>	<b>Bixi_Ind icateur</b>	<b>Marche_i ndicateur</b>	<b>Metro_In dicateur</b>	<b>Train_In dicateur</b>	<b>Bus_Ind icateur</b>
111	0.621	0.633	0.562	0.853	0.715	0.605	0.633	0.627
102	0.678	0.628	0.547	0.843	0.757	0.677	0.489	0.761
101	0.762	0.617	0.500	0.904	0.992	0.984	0.370	0.844

L'algorithme hiérarchique est d'abord appliqué, à l'aide du logiciel R, en utilisant les outils cités par Roth (2016) : le paquet NbClust qui permet de déterminer le nombre optimal de groupes en évaluant 30 indicateurs (Charrad, Ghazzali, Boiteau, & Niknafs, 2014) et la fonction hclust incluse

dans le paquet « stats » de R. La distance utilisée est la distance euclidienne et la méthode d'agglomération est la méthode hiérarchique agglomérative de Ward (Murtagh & Legendre, 2014) (la méthode est abrégée à ward.D2 dans R).

### 4.2.1 Secteurs de recensement

Cette section est divisée en deux parties : la première consiste en la classification des secteurs de recensement à partir de la base de données non traitées et la seconde en une analyse en composantes principales, utilisée ensuite pour effectuer la segmentation. Enfin, des statistiques descriptives sont analysées pour les différents groupes afin d'enrichir l'étude.

#### 4.2.1.1 Base de données non-traitées

Les corrélations des différents indicateurs calculés pour les secteurs de recensement sont montrées dans le Tableau 4.10. Les seules corrélations supérieures à 0.5 en valeurs absolues, et qui sont donc significatives, sont les paires vélo privé et partagé et l'automobile privée et la marche. La présence de corrélations importantes dans la base de données affecte la qualité de la segmentation négativement (Sambandam, 2003). C'est pour cette raison que l'analyse en composantes principales est ensuite utilisée pour créer une base de données qui ne présente pas de corrélations significatives.

Tableau 4.10 Corrélations entre les indicateurs pour les secteurs de recensement

	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
Automobile privée	1.00	0.16	0.00	0.10	0.55	0.08	0.42	0.14
Autopartage		1.00	0.27	0.31	0.23	0.16	0.34	-0.09
Vélo privé			1.00	0.64	0.10	0.11	-0.10	0.01
Vélopartage				1.00	0.28	0.16	0.23	0.07
Marche					1.00	0.37	0.46	0.32
Métro						1.00	0.22	0.12
Train de banlieue							1.00	0.34
Bus								1.00

En appliquant la fonction de classification hiérarchique sur cette base de données, le dendrogramme obtenu est présenté à la Figure 4.9.

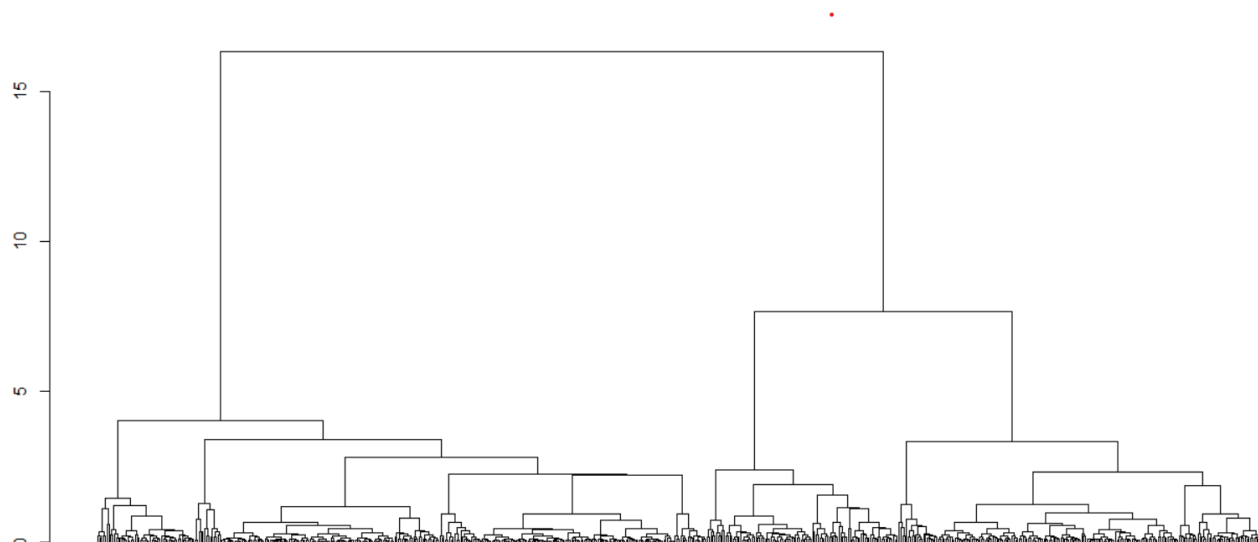


Figure 4.9 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement

La fonction NbClust est appliquée et fait varier le nombre de groupes de 2 à 15. La majorité des indicateurs trouvent que le nombre optimal de groupes est 3. Le dendrogramme est donc coupé pour obtenir trois groupes, comme illustré à la Figure 4.10.

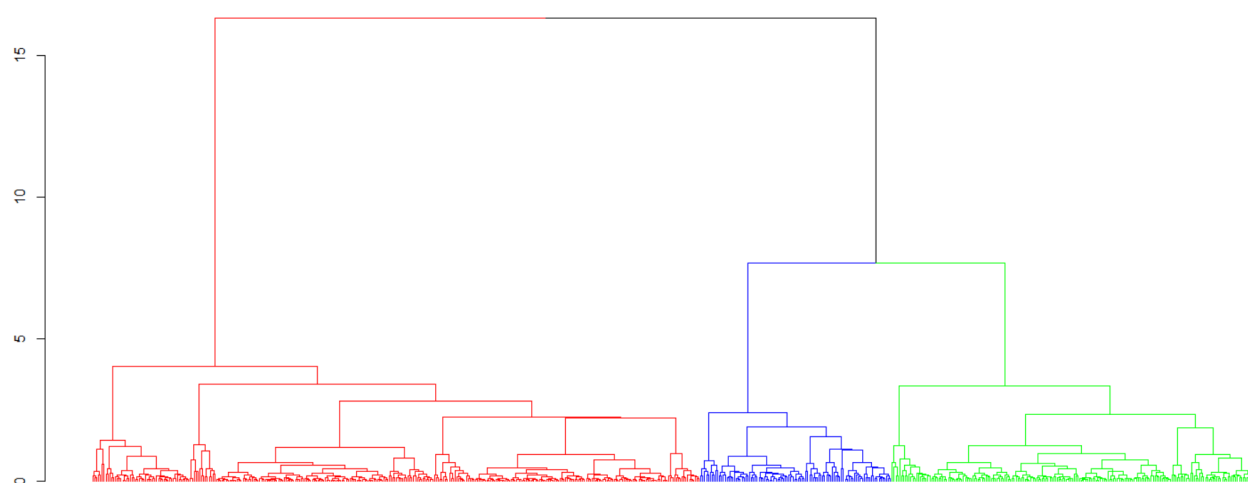


Figure 4.10 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement coupé pour créer 3 groupes

L'évaluation des distributions des indicateurs pour les différents modes (Figure 4.11) dans chaque groupe ainsi que la distribution spatiale (Figure 4.12), permet de voir que cette classification n'est pas très intéressante en termes de multimodalité. Les trois groupes semblent être : des zones périphériques, des zones centrales desservies par le métro et des zones centrales non-desservies par le métro.

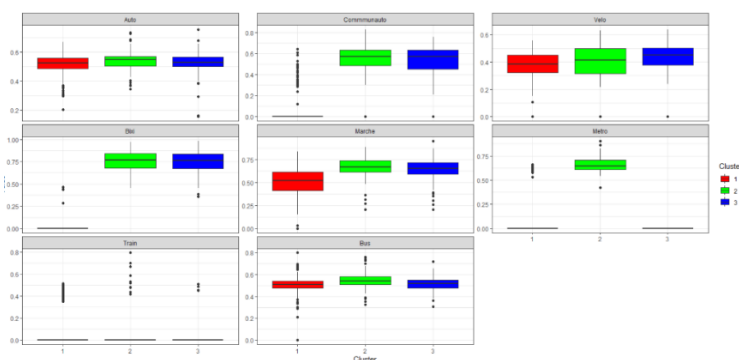


Figure 4.11 Distribution des indicateurs de modes pour les 3 groupes de secteurs de recensement

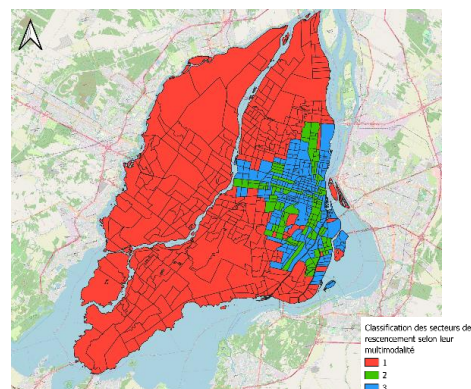


Figure 4.12 Distribution géographique des groupes de secteurs de recensement pour 3 groupes

Pour choisir un nombre de groupes pertinent pour l'analyse tout en garantissant une différenciation suffisante, deux indicateurs de caractérisation de la segmentation sont évalués : l'indice de Silhouette et l'indice de Davies-Bouldin. L'indicateur Silhouette est un coefficient qui mesure la distance moyenne entre les groupes ( $a$ ) et la distance moyenne à l'intérieur des groupes ( $b$ ), qui est calculé de la façon suivante :  $\frac{b-a}{\max(a,b)}$ . Un score qui se rapproche de 1 indique que les points appartiennent au bon groupe, un score qui se rapproche de 0 indique que les points pourraient appartenir à un autre groupe, et un score qui se rapproche de -1 indique que les points sont dans les mauvais groupes (Shahapure & Nicholas, 2020). L'indicateur Davies-Bouldin est défini comme la mesure de similarité moyenne de chaque groupe avec le groupe qui lui est le plus similaire, où la similarité est le rapport des distances intra-groupe aux distances inter-groupe. Par conséquent, des groupes plus éloignés les uns des autres et moins dispersés entraîneront un score supérieur. Le score minimum est de zéro, des valeurs plus basses indiquant une meilleure segmentation (Rojas Thomas, Santos Peñas, & Mora, 2013).

Pour ces deux indicateurs, présentés aux Figure 4.13 et Figure 4.14, le nombre optimal de groupes est de 3. Cependant, pour l'indice de Davies-Bouldin, le second meilleur nombre de groupes est de 6. En ce qui concerne l'indice de Silhouette, l'utilisation de 4, 5 ou 6 groupes donne des scores similaires. Par conséquent, 6 groupes ont été retenus, car cela offre des résultats plus intéressants sans affecter significativement la qualité de la segmentation.

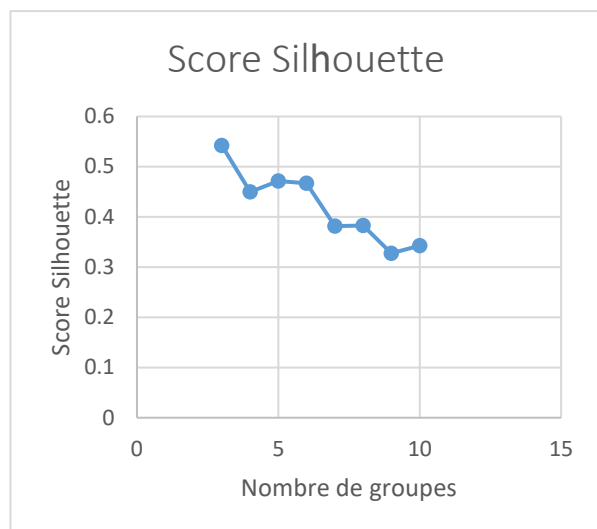


Figure 4.13 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes pour les secteurs de recensement

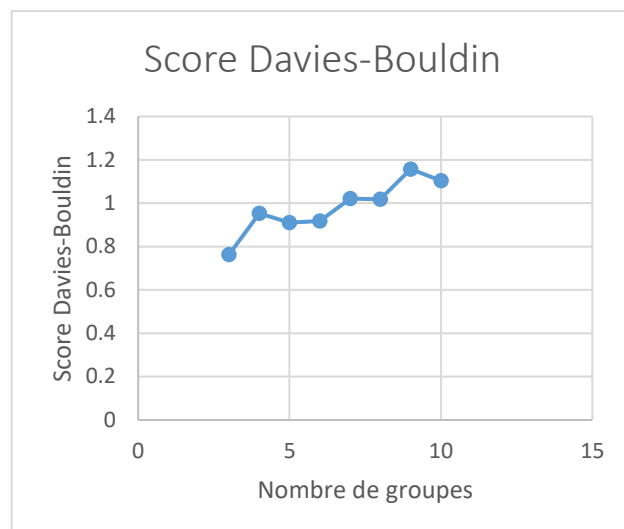


Figure 4.14 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes

Le dendrogramme résultant est présenté à la Figure 4.15.

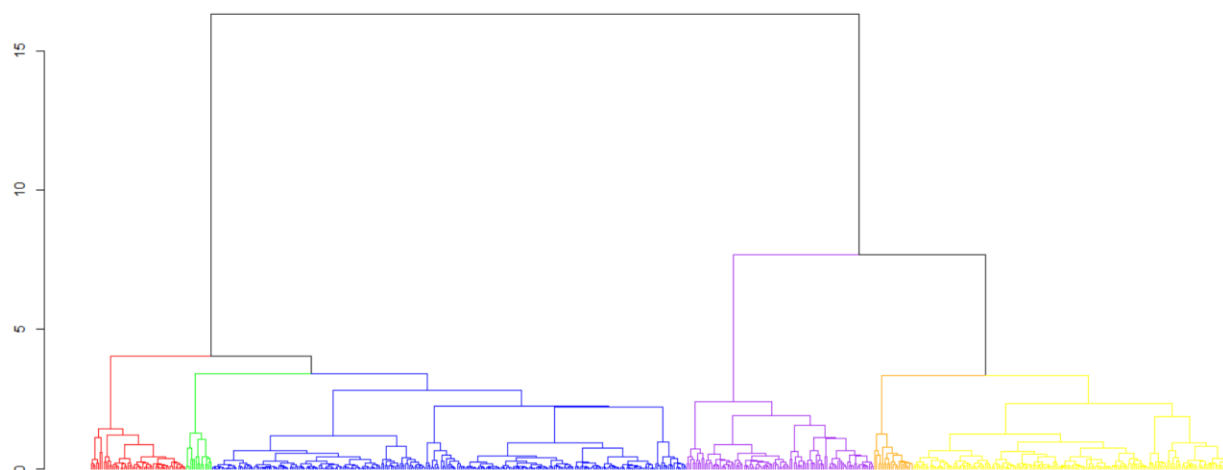


Figure 4.15 Dendrogramme de la classification agglomérative hiérarchique des secteurs de recensement coupé pour créer 6 groupes

La carte à la Figure 4.16 permet la visualisation de ces différents groupes.

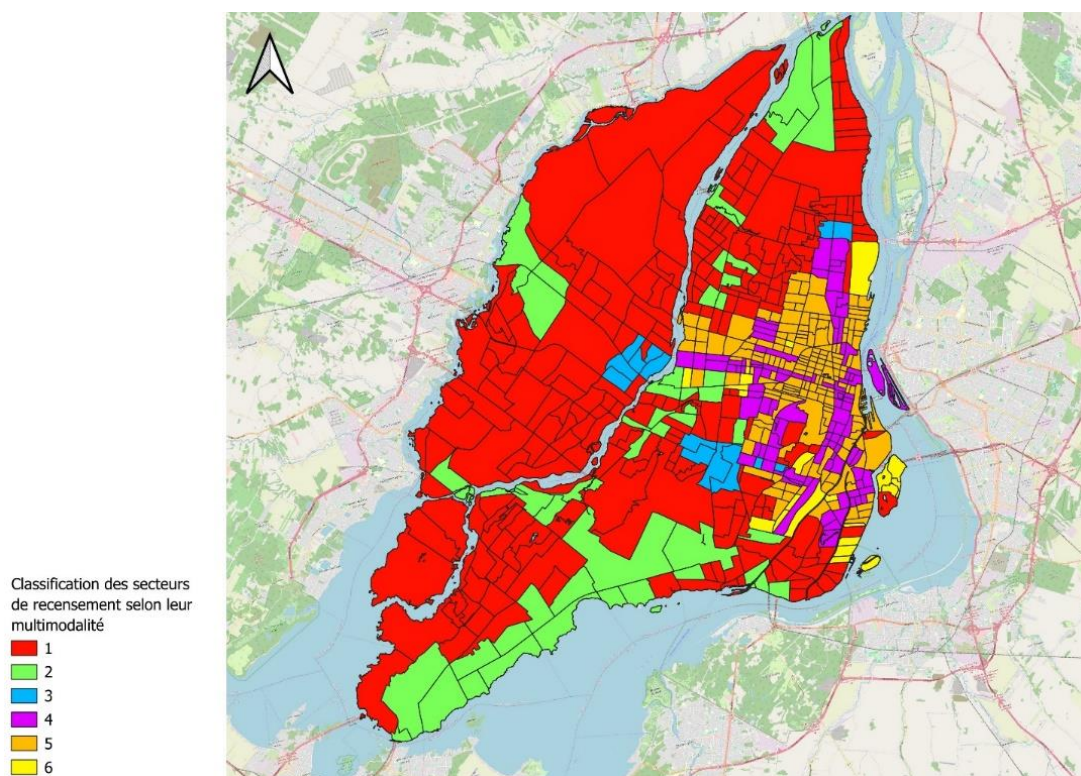


Figure 4.16 Distribution géographique des groupes de secteurs de recensement pour 6 groupes

Le nombre de secteurs de recensement par groupe est présenté dans le Tableau 4.11. La majorité des zones appartiennent aux groupes 1, 4 et 5 qui représentent la partie centrale de Montréal et les parties périphériques non-desservies par le train de banlieue.

Tableau 4.11 Nombre de secteurs de recensement par groupe

Numéro du groupe	Nombre de secteurs de recensement appartenant au groupe
1	258
2	52
3	14
4	102
5	175
6	21

Afin de caractériser ces groupes par rapport aux indicateurs des différents modes, les graphes en boîte à la Figure 4.17 montrant la distribution des indicateurs pour différents modes, sont analysés.

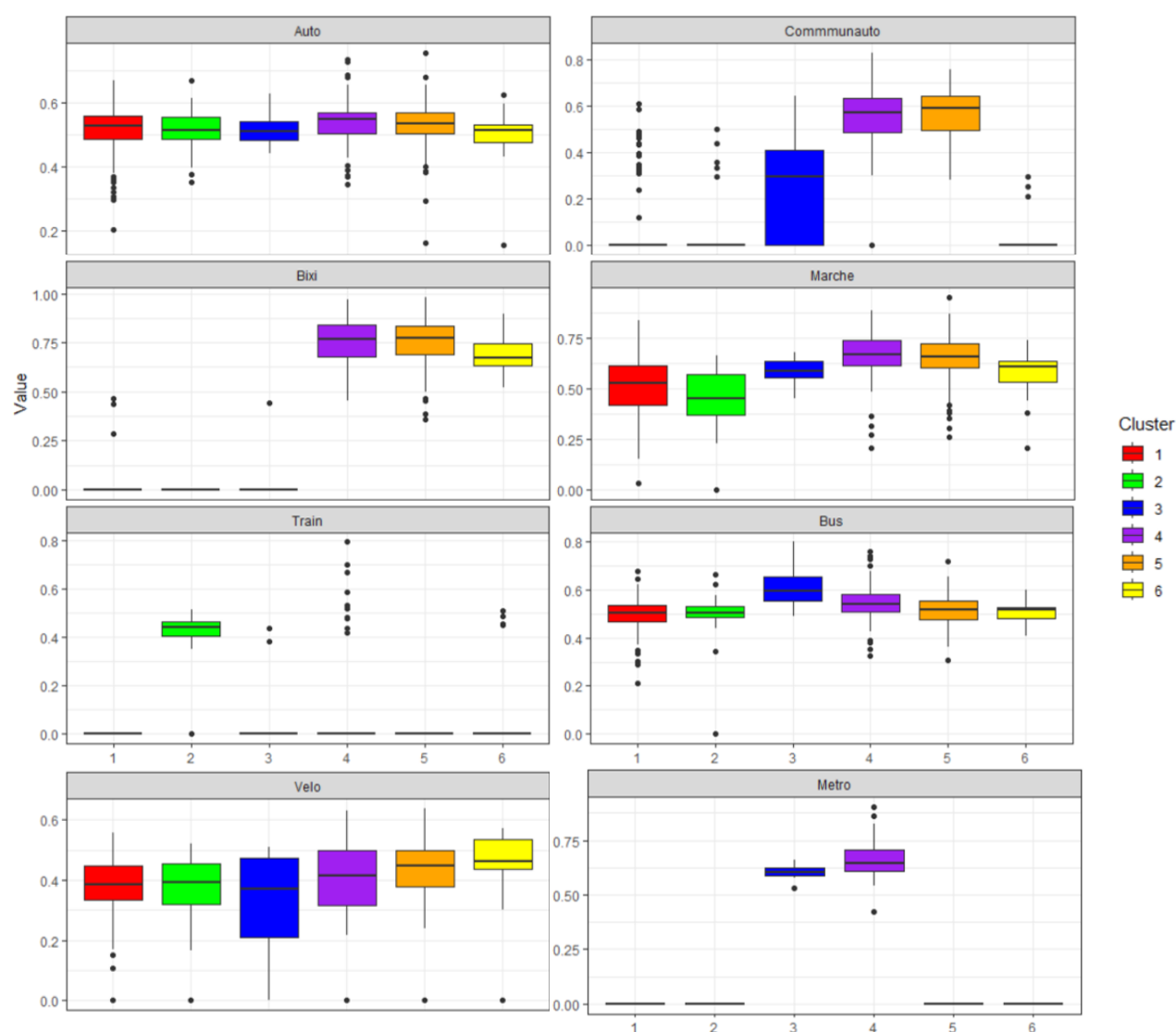


Figure 4.17 Distribution des indicateurs pour les différents groupes

En se basant sur les critères énoncés dans la méthodologie de comparaison des indicateurs, l'analyse des groupes est présentée dans le Tableau 4.12. Les zones 4 et 5 ont le plus de modes qui ont un score élevé, mais il est notable que ce ne soit pas exactement les mêmes modes même si ces zones sont adjacentes sur la carte. Il est intéressant de noter que le groupe 1 est desservi par le moins de modes mais que ces modes ont tous un score moyen comparé au groupe 2 qui a en plus le train de banlieue mais a un score bas pour trois des modes que ces groupes ont en commun. Le groupe 2 est considéré plus multimodal (par définition de la multimodalité) même si l'offre pour trois des

quatre modes est supérieure dans les zones du groupe 1. Les groupes 3 et 6 ont le moins de zones leur appartenant mais présentent des combinaisons de modes intéressantes, non-semblables aux autres groupes, comme être desservi par un des deux modes d'autopartages et avoir des scores élevé et moyen pour le bus et la marche mais bas pour l'automobile privée. Il est aussi notable que deux des groupes soient desservis par le métro. Pour une analyse de multimodalité la distinction entre des zones desservis ou non par le métro est plus intéressante que la distinction entre deux groupes qui ont des scores plus ou moins élevés pour le métro puisque ce mode ne dessert qu'une partie restreinte du territoire.

Tableau 4.12 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs de recensement obtenu avec les données non-traitées

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
2	Bas	N/A	Moyen	N/A	Bas	N/A	Élevé	Bas
3	Bas	Bas	Bas	N/A	Moyen	Bas	N/A	Élevé
4	Élevé	Élevé	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Moyen
5	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	N/A	Moyen
6	Bas	N/A	Élevé	Bas	Moyen	N/A	N/A	Moyen

Le Tableau 4.13 est obtenu en comptant le nombre de modes dans chaque catégorie pour chaque groupe.

Tableau 4.13 Nombre de modes par catégorie par groupe

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	0	4	0	4	6
2	3	1	1	5	5
3	4	1	1	6	3

Tableau 4.13 Nombre de modes par catégorie par groupe (suite)

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
4	0	2	5	7	1
5	0	2	4	6	2
6	2	2	1	5	4

Le groupe 2 a le nombre total de modes le plus élevé, suivi des groupes 3 et 5 puis des groupes 2 et 6 et enfin du groupe 1. Pour différencier entre les groupes 3 et 5, le nombre de modes avec scores élevés est comparé. Il est plus haut pour le groupe 5, qui est donc plus multimodal que le groupe 3. Les groupes 2 et 6 ont le même nombre de scores élevés mais le groupe 6 a plus de modes avec un score moyen, il est donc plus multimodal que le groupes 2. En appliquant la méthode décrite dans la section 3.4.Caractérisation de la multimodalité3.4, l'ordre des groupes du plus au moins multimodal est 4, 5, 3, 6, 2, 1.

Pour enrichir les groupes formés et mieux les décrire, la base de données décrite dans la section 3.1.9 est ajoutée à la base de données de segmentation. Les distributions des attributs ajoutés pour chaque groupe peuvent être vues dans les graphes en boîte à la Figure 4.18. De gauche à droite, et de haut en bas, les différents quadrants représentent les indicateurs suivants : la densité de la population au kilomètre carré, l'âge moyen de la population, la taille moyenne des ménages privés, le revenu total médian des ménages en 2015, le taux de vieux logements, le taux de nouveaux logements, la valeur médiane des logements, le pourcentage de trajets domicile-travail réalisés à l'intérieur du secteur de recensement, la part du territoire urbanisée par zone et le taux d'emploi.

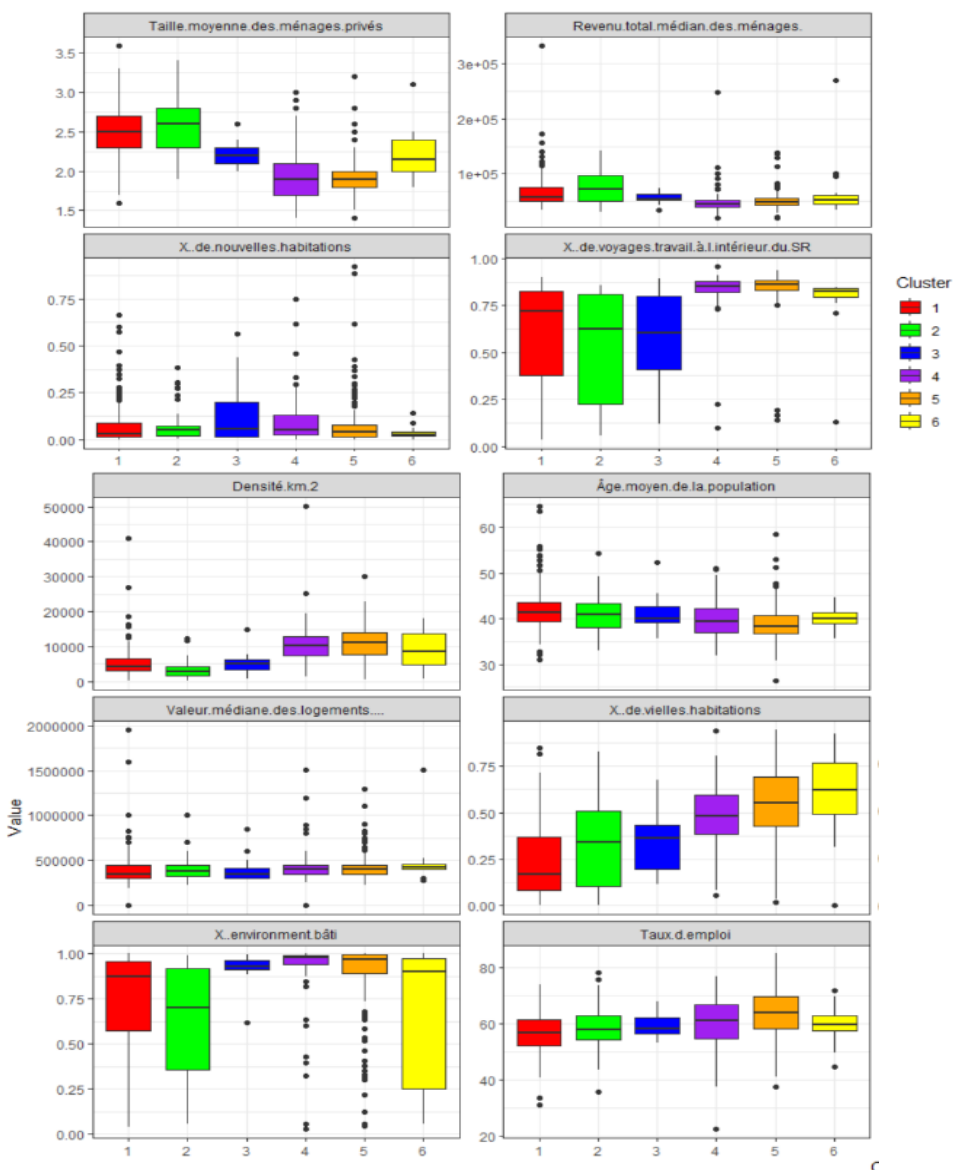


Figure 4.18 Distribution des indicateurs descriptifs pour les différents groupes

Les caractéristiques montrant le plus de variation pour les différents groupes sont la taille moyenne des ménages, le revenu total des ménages, le taux de vieux logements, le taux de voyages domicile-travail à l'intérieur du secteur de recensement et la part du territoire urbanisée.

Le Tableau 4.14, ordonné du groupe de zones le moins multimodal au plus multimodal, résume les caractéristiques descriptives principales des groupes, en se basant sur les valeurs médianes.

Tableau 4.14 Caractéristiques descriptives principales des groupes, du moins au plus multimodal

Groupe	Caractéristiques descriptives principales
1	Zones périphériques, peu densément peuplées, taille moyenne des ménages élevée avec des revenus médians élevés. Taux de vieux logements le plus bas.
2	Zones périphériques, peu densément peuplées, taille moyenne des ménages élevée avec des revenus médians élevé. La part du territoire urbanisée la plus petite.
6	Zones à la limite du centre, moins densément peuplées que les zones centrales (groupes 4 et 5), taux de vieux logements le plus haut.
3	Zones périphériques plus densément peuplées que les autres, le plus haut taux de nouveaux logements; les habitants de ces secteurs y travaillent moins que les autres.
5	Zones centrales densément peuplées, avec des revenus médians bas et des petits ménages élevés, une part du territoire urbanisée plus grande que celle des autres secteurs et les déplacements pour le travail se font davantage dans le secteur que les autres secteurs.
4	Zones centrales densément peuplées, avec des revenus médians bas et des petits ménages, une part du territoire urbanisée plus grande que celle des autres secteurs, et les déplacements pour le travail se font davantage dans le secteur que dans les autres secteurs.

Cette analyse montre que les zones les plus multimodales sont celles qui sont centrales, densément peuplées, avec de petits ménages, des revenus médians bas (expliqués par la taille des ménages), des emplois dans la zone et une part du territoire urbanisé élevée. À l'inverse, les zones les moins multimodales sont celles qui sont périphériques, peu densément peuplées avec des ménages plus grands et donc des revenus plus élevés, et des parts du territoire urbanisée plus petites.

#### 4.2.1.2 Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique qui permet de transformer une base de données composées de plusieurs variables en une base de données comprenant moins de variables appelées les composantes principales qui expliquent la majorité de la variation dans les données initiales. Les nouvelles composantes sont des combinaisons linéaires des variables initiales et ne sont pas corrélées (Greenacre et al., 2022). La fonction `prcomp` dans le paquet « stats » de R est utilisée afin de réaliser l'analyse en composantes principales (R. Core Team,

2019). Le traitement des données de cette façon est utile puisqu'il élimine les corrélations et réduit le nombre de dimensions de la base de données en ne gardant que les composantes qui expliquent la majorité de la variation observée dans la base de données.

Cette analyse appliquée à la base de données relative aux secteurs de recensement produit huit composantes principales. Le Tableau 4.15 montre la composition de ces composantes.

Tableau 4.15 Coefficient des indicateurs pour les des composantes principales

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Automobile privée	0.25	0.51	-0.46	0.31	-0.26	-0.34	0.42	0.06
Autopartage	0.51	-0.26	0.06	-0.15	-0.19	0.23	0.36	-0.66
Vélo privé	0.16	-0.41	0.17	0.80	0.04	-0.28	-0.19	-0.10
Vélopartage	0.50	-0.32	0.06	-0.07	-0.21	0.20	0.12	0.73
Marche	0.46	0.30	-0.29	0.03	0.03	0.26	-0.73	-0.11
Métro	0.33	0.11	0.41	-0.39	0.00	-0.72	-0.17	-0.02
Train de banlieue	-0.12	0.39	0.59	0.20	-0.61	0.26	-0.07	-0.01
Bus	0.25	0.38	0.38	0.19	0.69	0.23	0.27	0.06

La proportion de la variabilité dans la base de données expliquée par les différentes composantes est présentée dans le Tableau 4.16

Tableau 4.16 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Écart-type	1.70	1.10	1.05	0.99	0.91	0.78	0.51	0.37
Proportion de la variabilité	0.36	0.15	0.14	0.12	0.10	0.08	0.03	0.02
Proportion cumulative	0.36	0.51	0.65	0.77	0.87	0.95	0.98	1.00

Les cinq premières composantes expliquent 87% de la variabilité dans la base de données et seront donc retenues. La corrélation des nouvelles variables est montrée dans le Tableau 4.17; les valeurs confirment que les composantes principales ne sont pas corrélées entre elles.

Tableau 4.17 Coefficients de corrélations des composantes créées par l'analyse en composantes principales

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
PC1	1	-3.8E-17	5.5E-16	-2.0E-16	2.6E-16

Tableau 4.17 Coefficients de corrélations des composantes créés par l'analyse en composantes principales (suite)

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
PC2		1	-7.5E-16	-2.0E-16	5.5E-16
PC3			1	3.9E-17	1.5E-15
PC4				1	1.3E-15
PC5					1

Les graphes (Figure 4.19 et Figure 4.20) montrent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin, qui indiquent que le nombre optimal de groupes est 8. Ils montrent aussi que les deux scores ne varient pas beaucoup entre 6 et 8 groupes. Pour comparer les deux méthodes de préparation des données, le nombre de groupes choisi est 6.

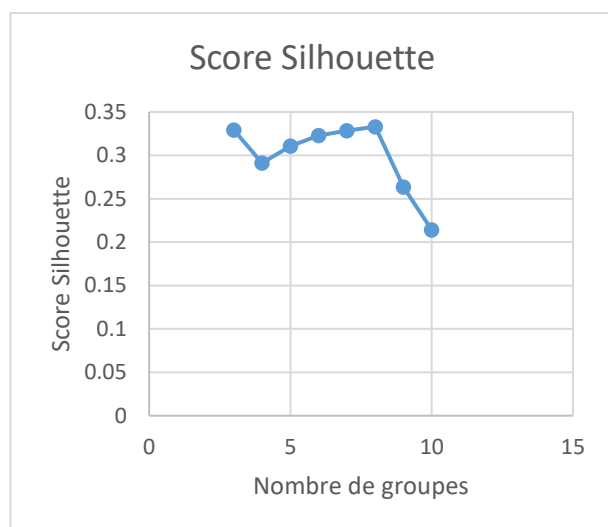


Figure 4.19 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

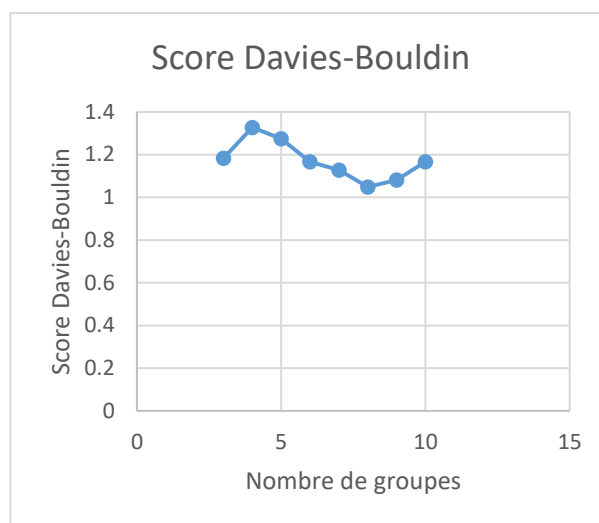


Figure 4.20 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

Le dendrogramme avec les 6 groupes marqués est présenté à la Figure 4.21.

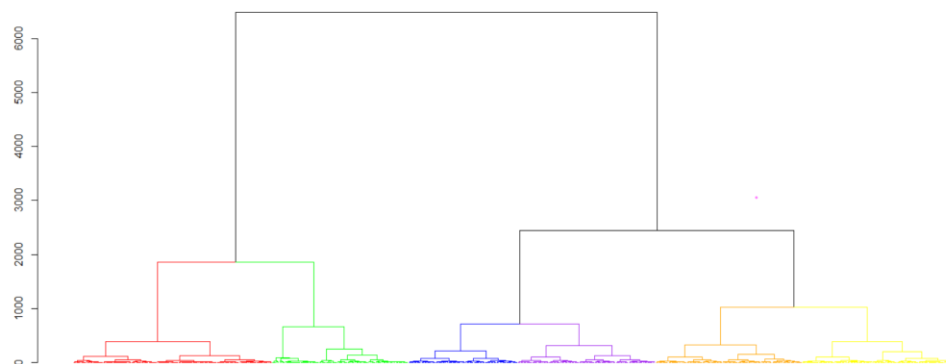


Figure 4.21 Dendrogramme obtenu de la classification des variables de l'analyse en composantes principales

Les graphes en boîte à la Figure 4.22 montre la distribution des indicateurs pour les différents groupes.

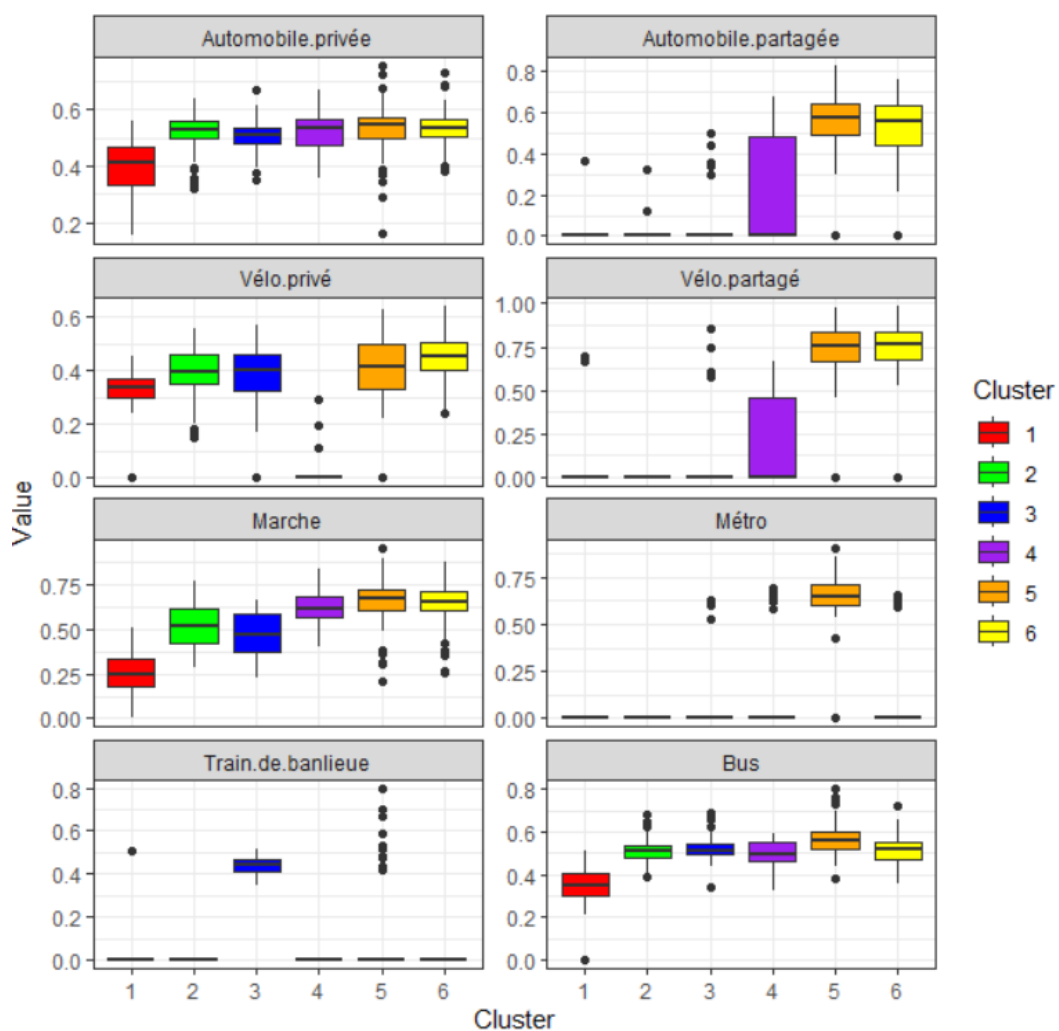


Figure 4.22 Distribution des indicateurs pour les différents groupes

La carte à la Figure 4.23 montre les secteurs de recensement selon le groupe auquel ils appartiennent.

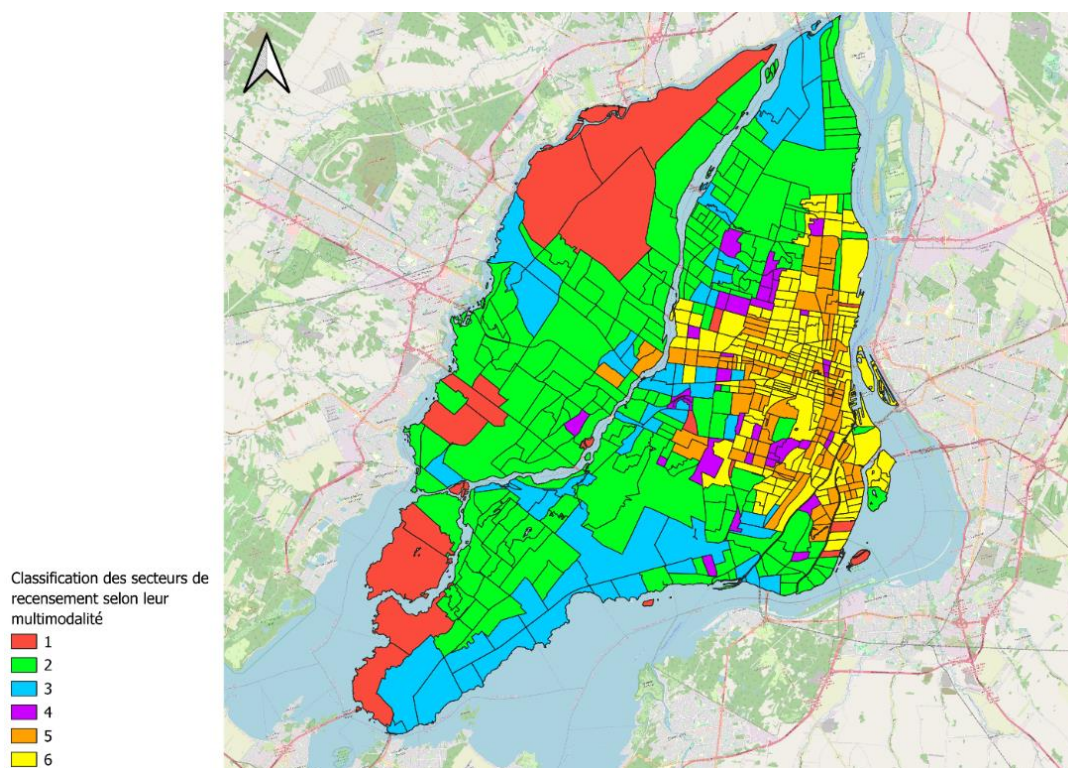


Figure 4.23 Distribution des groupes de secteurs de recensement classifié selon les variables de l'analyse en composantes principales

Le nombre de secteurs de recensement par groupe, ainsi que la population totale de ces secteurs sont présentés dans le Tableau 4.18. Le calcul du nombre d'habitant de chaque type de zone a été réalisé en se basant sur les données de population des aires de diffusion issues du recensement de 2016 (CHASS Data Center, 2016).

La majorité des secteurs appartient aux groupes 2, 5 et 6, qui représentent la partie centrale de Montréal et les parties périphériques non-desservies par le train de banlieue

Tableau 4.18 Nombre de secteurs de recensement par groupe

Numéro du groupe	Nombre de secteurs de recensement appartenant à chaque groupe	Population
1	19	60767
2	207	940328
3	57	258884

Tableau 4.18 Nombre de secteurs de recensement par groupe (suite)

Numéro du groupe	Nombre de secteurs de recensement appartenant à chaque groupe	Population
4	40	128032
5	104	329325
6	195	584570

Le Tableau 4.19 catégorise le niveau des modes pour chaque groupe de secteurs et il est résumé dans le Tableau 4.20. Ce dernier est ensuite utilisé pour classer les groupes du plus au moins multimodal, en comparant le nombre de modes dans chacune des catégories en commençant par le nombre total de modes, ensuite le nombre de modes avec score élevé et enfin le nombre de modes avec score moyen. Il est intéressant de noter que dans les groupes 1, 2, il y a un ordre clair de multimodalité qui est ensuite confirmé par la méthode utilisée plus bas. Les groupes 1 et 2 sont desservis par les mêmes modes qui ont tous un score bas pour le groupe 1 et un score moyen pour le groupe 2. Le groupe 4 a trois modes en commun avec les groupes 1 et 2 et les deux modes partagés en plus, le rendant plus multimodal que ces deux groupes. Les modes sont répartis de la même façon dans les groupes 3 et 2 mais ce dernier contient le train de banlieue en plus. Ce groupe a aussi plus de modes avec un score élevé que le groupe 4, le rendant plus multimodal que ce dernier. Le groupe 6 a un mode en plus et des scores meilleurs ou égaux pour les autres modes par rapport au groupe 3. Enfin, le groupe 5 est le plus multimodal avec sept modes dont cinq ont un score élevé. Dans cette segmentation, il y a un seul groupe de zones desservi par le métro, ce qui permet de prendre en compte l'aspect unique que ce mode a sur la multimodalité de l'offre.

Tableau 4.19 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs de recensement obtenu avec les données non-traitées

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Bas	N/A	Bas	N/A	Bas	N/A	N/A	Bas
2	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
3	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Élevé	Moyen

Tableau 4.19 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs de recensement obtenu avec les données non-traitées (suite)

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
4	Moyen	Bas	N/A	Bas	Moyen	N/A	N/A	Moyen
5	Élevé	Élevé	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Élevé
6	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	N/A	Moyen

Tableau 4.20 Nombre de modes par catégorie par groupe

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	4	0	0	4	6
2	0	4	0	4	5
3	0	4	1	5	3
4	2	3	0	5	4
5	0	1	6	7	1
6	0	2	4	6	2

Les groupes, du plus au moins multimodal, sont : 5, 6, 3, 4, 2, 1.

Les distributions des indicateurs descriptifs pour les différents groupes sont montrées dans les graphes en boîte à la Figure 4.24.

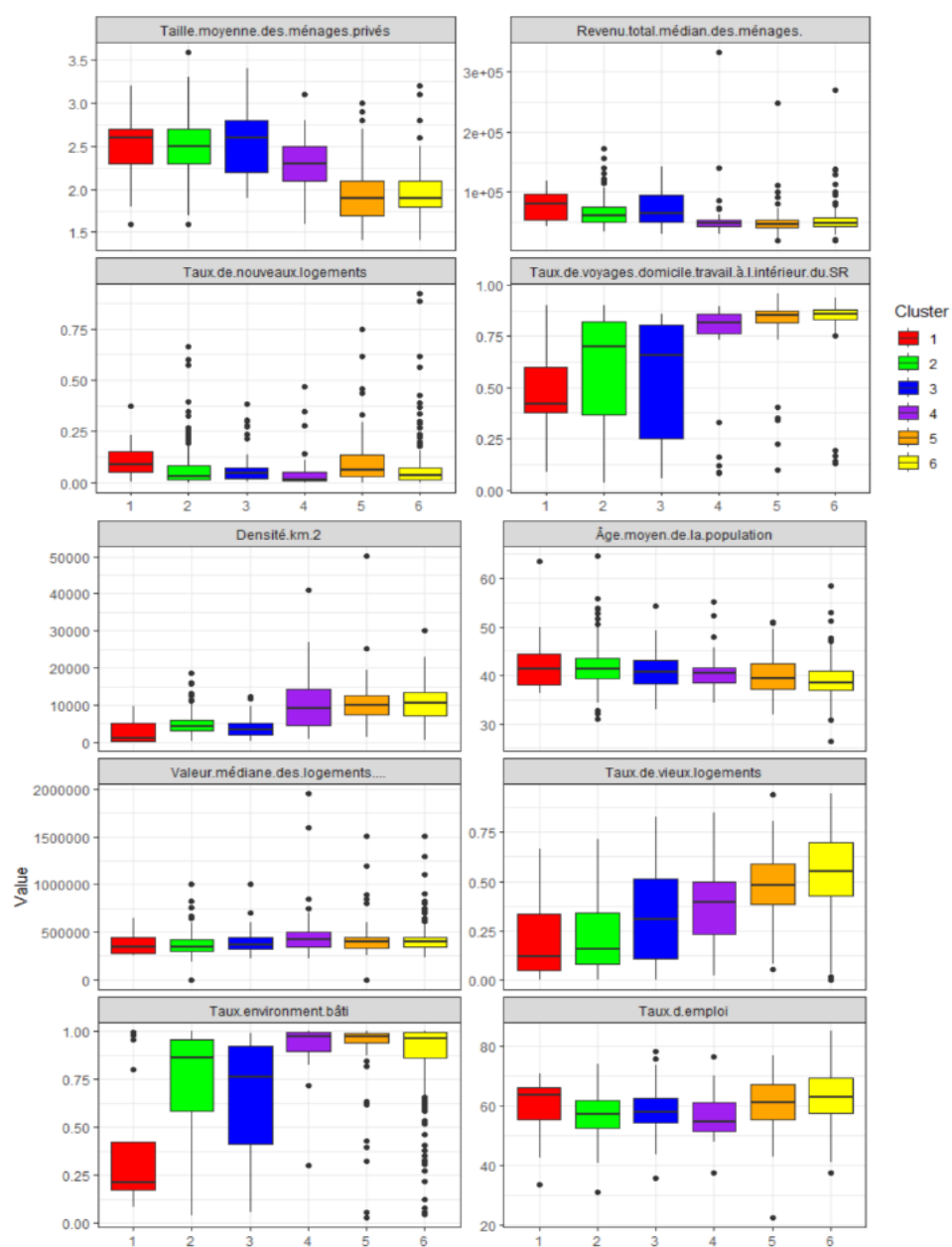


Figure 4.24 Distribution des indicateurs descriptifs pour les différents groupes

Le Tableau 4.21 permet de résumer les caractéristiques des différentes zones, des moins multimodales au plus multimodales

Tableau 4.21 Caractéristiques descriptives principales des groupes, du moins au plus multimodal

Groupe	Caractéristiques descriptives principales
1	Zones périphériques. Densité, taux de vieux logements et taux de déplacements domicile-travail dans le secteur les plus faibles et une part du territoire urbanisée plus petite que pour les autres secteurs. Taux de nouveaux logements, taille moyenne des ménages et revenu total médian les plus élevés. Age moyen élevé.
2	Zones périphériques. Densité de population et taux de vieux logements faibles. Taille moyenne des ménages et revenus élevés. Taux de déplacements domicile-travail dans le secteur et part du territoire urbanisé sont variables, les plus élevés entre les zones périphériques.
4	Zones à la limite du centre. Densité de population variable, mais généralement élevée. Taille de ménage, âge moyen, taux de vieux logements et de déplacements domicile-travail dans le secteur moyens. Pour ces éléments, ces zones ont des valeurs médianes qui se situent entre celles des zones périphériques et centrales. Taux de nouveaux logements le plus bas.
3	Zones périphériques. Taux de vieux logements le plus haut entre les zones périphériques. Densité de population et taux de nouveaux logements faibles. Age moyen, taille moyenne des ménages et revenu total élevés. Part du territoire urbanisée variable, le deuxième plus faible.
6	Zones centrales. Les plus densément peuplées, avec l'âge moyen le plus faible. Une taille moyenne et revenu total médian faible. Le plus haut taux de vieux logements et de déplacements domicile-travail dans le secteur.
5	Zones centrales. Densément peuplées, avec de petits ménages. Revenu médian le plus faible. Taux élevés de nouveaux logements et de déplacements domicile-travail dans le secteur.

Ces données révèlent que les zones les moins multimodales partagent plusieurs caractéristiques communes. Il s'agit de zones périphériques, moins densément peuplées, avec moins de vieux logements, des tailles de ménage moyennes et des revenus totaux médians plus élevés. Les résidents de ces zones sont plus susceptibles de sortir de leur secteur de recensement pour travailler. En revanche, les zones plus multimodales sont situées au centre, sont plus densément peuplées, ont

moins de personnes par ménage et un nombre plus élevé de vieux logements. Les habitants de ces zones se déplacent moins pour aller travailler et la part du territoire urbanisée y est moins variable.

Une comparaison des deux classifications montre que les groupes obtenus avec l'analyse en composantes principales sont plus distincts en termes de distribution des indicateurs, et arrivent à mieux regrouper les zones où l'offre est similaire. Ils sont donc plus interprétables et produisent des résultats plus intéressants. En particulier, cette seconde classification révèle des distinctions importantes entre les secteurs périphériques qui n'étaient pas présentes dans la première classification. C'est pourquoi l'analyse en composantes principales va être appliquée avant de réaliser les classifications pour les autres divisions.

### 4.2.2 Secteurs municipaux

Les indicateurs calculés pour les secteurs municipaux sont très corrélés, comme vu dans le Tableau 4.22. Cela montre l'importance d'utiliser l'analyse en composantes principales pour éliminer les corrélations dans la base de données.

Tableau 4.22 Corrélations entre les indicateurs des modes pour les secteurs municipaux

	<b>Automobile privée</b>	<b>Autopartage</b>	<b>Vélo privé</b>	<b>Vélopartage</b>	<b>Marche</b>	<b>Métro</b>	<b>Train de banlieue</b>	<b>Bus</b>
Automobile privée	1.00	0.31	0.24	0.34	0.54	0.57	0.29	0.48
Autopartage		1.00	0.56	0.83	0.54	0.58	0.33	0.26
Vélo privé			1.00	0.67	0.46	0.21	-0.05	0.56
Vélopartage				1.00	0.62	0.50	0.49	0.29
Marche					1.00	0.68	0.07	0.77
Métro						1.00	0.52	0.43
Train de banlieue							1.00	0.27
Bus								1.00

L'analyse en composantes principales produit les huit composantes présentées dans le Tableau 4.23.

Tableau 4.23 Composition des nouvelles composantes pour les secteurs municipaux

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Automobile privée	0.27	0.52	0.10	-0.67	-0.33	-0.17	-0.10	-0.20
Autopartage	0.43	-0.12	0.14	0.12	-0.31	0.07	0.81	0.00
Vélo privé	0.26	-0.10	-0.90	-0.16	-0.06	0.05	-0.01	0.29
Vélopartage	0.41	-0.24	0.05	0.12	-0.22	0.61	-0.42	-0.39
Marche	0.40	0.02	0.33	-0.25	0.49	0.26	-0.06	0.59
Métro	0.41	-0.08	0.14	0.39	-0.29	-0.59	-0.38	0.27
Train de banlieue	-0.01	0.78	-0.10	0.50	-0.07	0.31	0.01	0.17
Bus	0.40	0.16	-0.16	0.16	0.63	-0.27	0.08	-0.53

84% de la variabilité est expliquée par les trois premières composantes, comme vu dans le Tableau 4.24, qui sont donc retenues pour la classification.

Tableau 4.24 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Écart-type	2.13	1.18	0.90	0.70	0.63	0.47	0.30	0.26
Proportion de la variabilité	0.57	0.17	0.10	0.06	0.05	0.03	0.01	0.01
Proportion cumulative	0.57	0.74	0.84	0.90	0.95	0.98	0.99	1.00

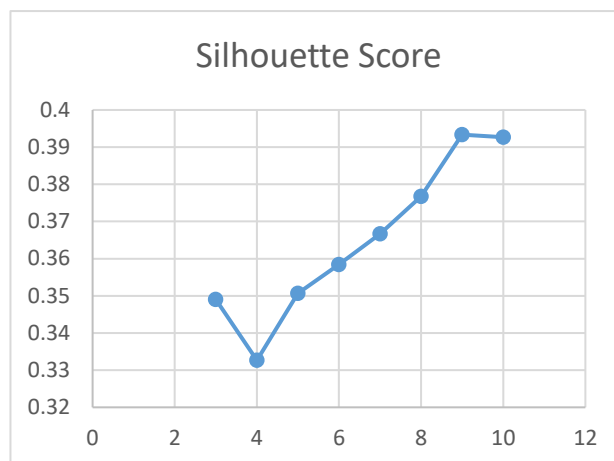


Figure 4.25 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

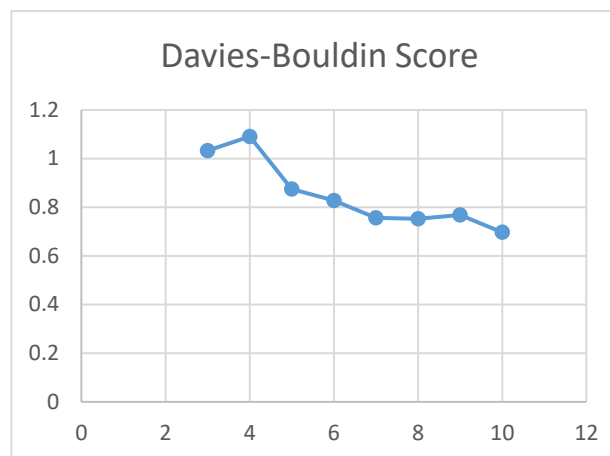


Figure 4.26 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

La Figure 4.25 et la Figure 4.26 présentent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin, qui montrent que le nombre optimal de groupes est 10. Mais cela représente trop de groupes, surtout pour 49 secteurs municipaux. Le nombre de groupes choisi est donc 6, puisque c'est le nombre raisonnable de groupes qui a le meilleur score.

Ce choix résulte en un des groupes formés ne contenant qu'une zone mais l'omettre résulte en une classification en 4 groupes comme montré pour les secteurs de recensement, moins intéressant à analyser. Le dendrogramme avec les 6 groupes marqués est présenté à la Figure 4.27.

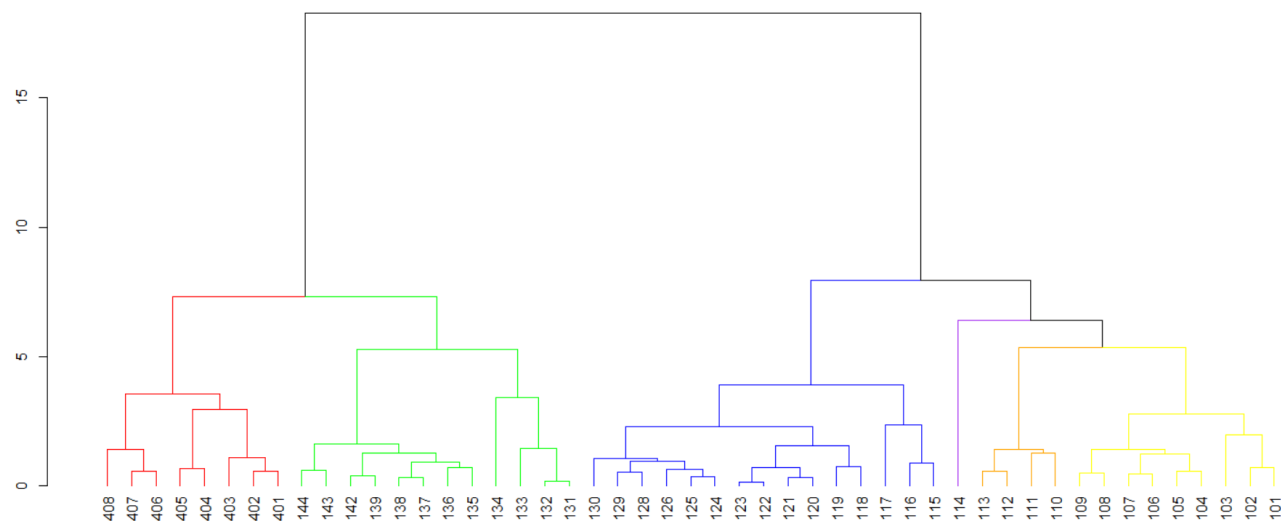


Figure 4.27 Dendrogramme obtenu de la classification des secteurs municipaux selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les graphes en boîte de la Figure 4.28 montrent la distribution des indicateurs pour les différents groupes et la Figure 4.29 montrent la classification des zones sur la carte.

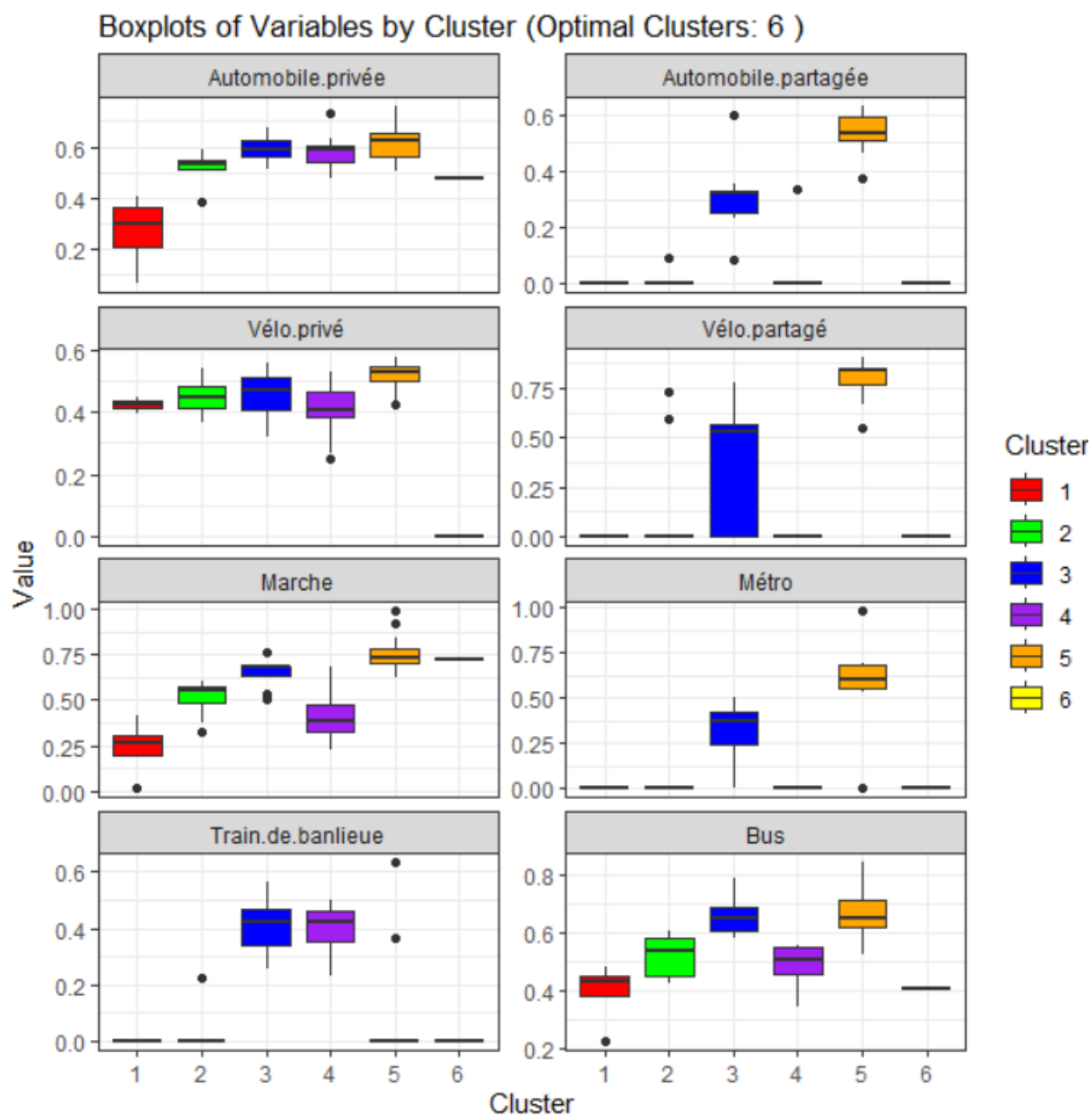


Figure 4.28 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de secteurs municipaux

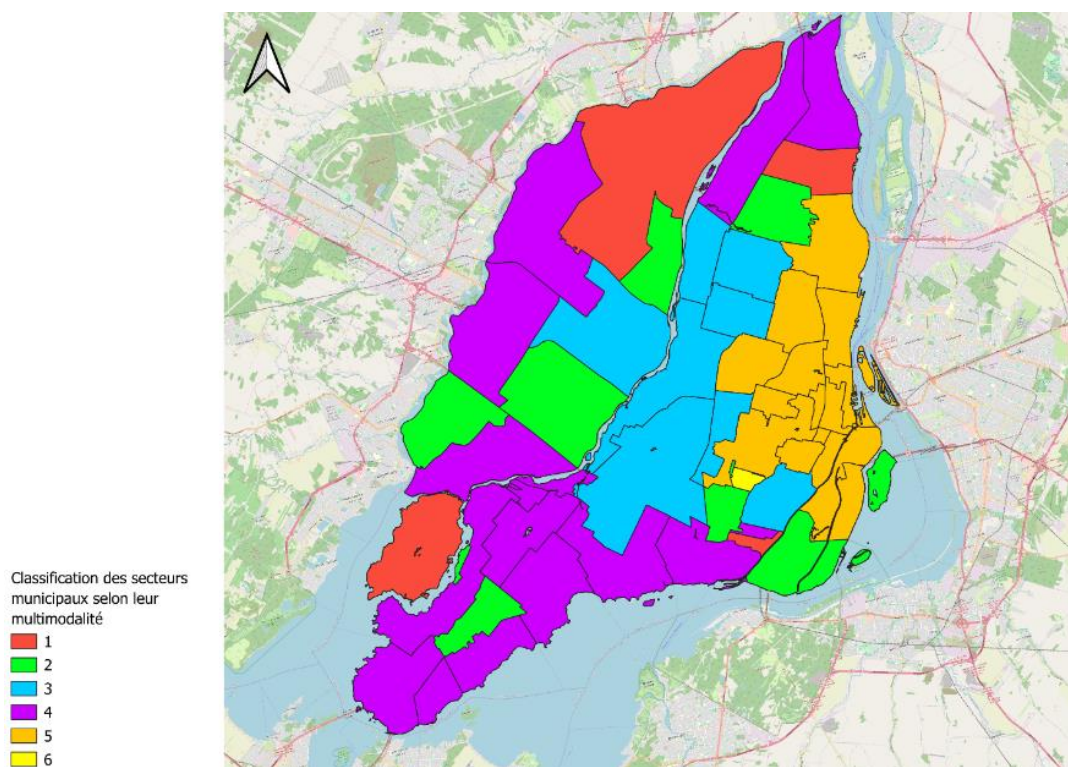


Figure 4.29 Distribution des groupes de secteurs municipaux classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales

Le nombre de secteurs ainsi que la population par groupe sont montrés dans le Tableau 4.25. La majorité des secteurs appartiennent aux groupes 4 et 5, qui regroupent les zones les plus périphériques et les plus centrales.

Tableau 4.25 Nombre de secteurs de municipaux par groupe

Numéro du groupe	Nombre de secteurs municipaux appartenant au groupe	Population
1	4	57268
2	9	342787
3	8	612553
4	15	494450
5	12	799420
6	1	6834

Le Tableau 4.26 catégorise le niveau des modes pour chaque groupe de secteurs, en se basant sur les valeurs médianes des indicateurs pour chaque mode. Le Tableau 4.27 montre un résumé du

Tableau 4.26 en comptant le nombre de modes appartenant à chaque catégorie. Ce nombre va ensuite permettre d'ordonner les groupes du plus au moins multimodal. Cette classification permet d'observer deux groupes desservis par le métro et deux groupes desservis par le train de banlieue.

Tableau 4.26 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de secteurs municipaux obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Bas	N/A	Bas	N/A	Bas	N/A	N/A	Bas
2	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Élevé	N/A	N/A	Moyen
3	Moyen	Bas	Moyen	Bas	Élevé	Bas	Élevé	Élevé
4	Moyen	N/A	Bas	N/A	Bas	N/A	Élevé	Moyen
5	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Élevé
6	Moyen	N/A	N/A	N/A	Élevé	N/A	N/A	Bas

Tableau 4.27 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les secteurs municipaux

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	4	0	0	4	4
2	0	3	1	4	6
3	3	2	3	8	2
4	2	2	1	5	1
5	0	0	7	7	3
6	1	1	1	3	5

Les groupes, du plus au moins multimodal sont : 3, 5, 4, 2, 1, 6.

Le groupe le moins multimodal est le groupe 6 qui est constitué d'un seul secteur municipal qui n'est desservi que par 3 modes. Comme pour les secteurs de recensement le groupe qui est desservi par le moins de modes (à part le groupe 6) a aussi des scores bas pour ces modes, ce qui semble

cohérent. De même cette classification permet de distinguer entre les secteurs périphériques bien et mal desservis par les mêmes modes à l'aide des groupes 1 et 2. Le groupe 4 présente un mode en plus par rapport au groupe 2 mais des scores moins bons pour 2 des modes que ces groupes ont en commun. Le groupe 3 est intéressant puisqu'il est desservi par tous les modes avec des scores variables et, pour cette raison, est considéré plus multimodal que le groupe 5 qui regroupe les secteurs centraux qui ont un score élevé pour tous les modes sauf le train de banlieue.

### 4.2.3 Les aires de diffusion

Comme montré dans le Tableau 4.28, deux paires d'indicateurs calculés pour les aires de diffusion sont corrélées: ceux du vélo privé et partagé, ceux du métro et de la marche et ceux du train de banlieue et du métro. Ces corrélations importantes montrent la nécessité de traiter les données avant la segmentation.

Tableau 4.28 Corrélations entre les indicateurs des modes pour les aires de diffusion

	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
Automobile privée	1	0.141	-0.024	-0.049	0.273	0.090	0.201	-0.022
Autopartage		1	0.219	0.292	0.143	0.238	0.135	-0.069
Vélo privé			1	0.779	0.235	0.143	-0.037	0.110
Vélopartage				1	0.174	0.310	-0.204	0.039
Marche					1	0.290	0.292	0.164
Métro						1	0.656	0.165
Train de banlieue							1	0.043
Bus								1.000

L'analyse en composantes principales produits les huit composantes montrées dans le Tableau 4.29.

Tableau 4.29 Composition des nouvelles composantes pour les aires de diffusion

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Automobile privée	0.05	-0.60	-0.57	0.11	0.28	-0.31	-0.36	-0.05
Autopartage	0.58	0.04	0.14	-0.03	0.14	0.18	-0.35	0.68

Tableau 4.29 Composition des nouvelles composantes pour les aires de diffusion (suite)

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Vélo privé	0.18	0.36	-0.19	0.77	0.30	-0.12	0.31	0.04
Vélopartage	0.59	0.06	0.16	-0.01	0.12	0.18	-0.24	-0.72
Marche	0.38	-0.50	-0.12	-0.07	-0.15	0.27	0.70	0.05
Métro	0.31	0.28	-0.08	-0.47	0.08	-0.72	0.26	0.01
Train de banlieue	-0.05	0.40	-0.67	-0.36	0.20	0.47	0.03	-0.01
Bus	0.21	0.15	-0.35	0.19	-0.85	-0.09	-0.19	0.00

La proportion de la variabilité expliquée par chaque composante est montrée dans le Tableau 4.30. 90% de la variabilité est expliquée par les six premières composantes, qui sont alors retenues pour la classification.

Tableau 4.30 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les aires de diffusion

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Écart-type	1.50	1.09	1.02	0.99	0.97	0.89	0.75	0.49
Proportion de la variabilité	0.28	0.15	0.13	0.12	0.12	0.10	0.07	0.03
Proportion cumulative	0.28	0.43	0.56	0.68	0.80	0.90	0.97	1.00

Les Figure 4.30 et Figure 4.31 montrent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin. Ils indiquent que le nombre optimal de groupes est 5, avec 6 groupes offrant les deuxièmes meilleurs scores pour l'indicateur Davies-Bouldin. Les deux classifications ont été effectuées, et celle avec 6 groupes offrait une meilleure classification pour les zones périphériques. Par conséquent, ce nombre de groupes a été choisi.

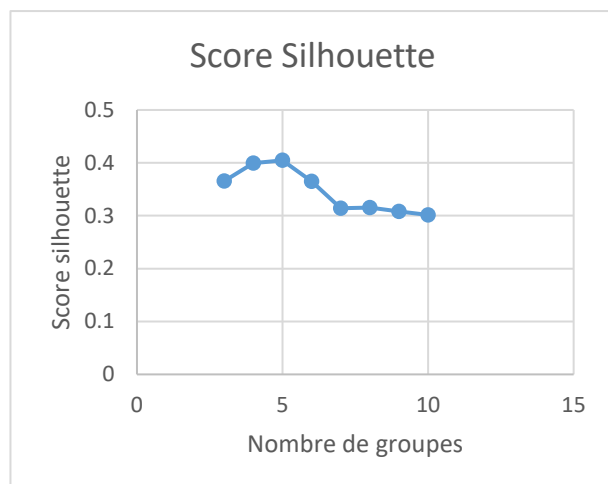


Figure 4.30 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

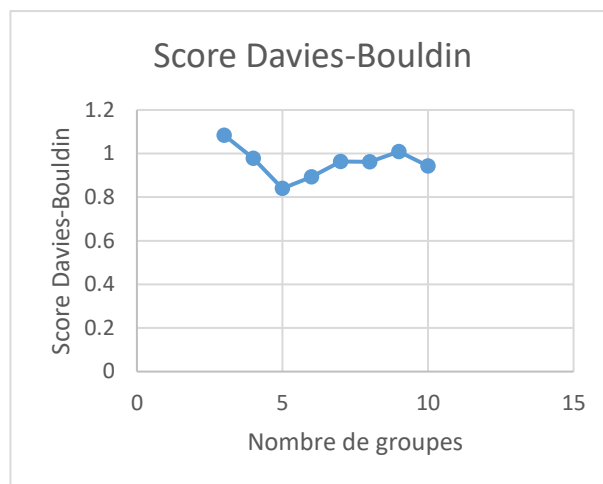


Figure 4.31 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes

Le dendrogramme avec les 6 groupes marqués est présenté à la Figure 4.32.

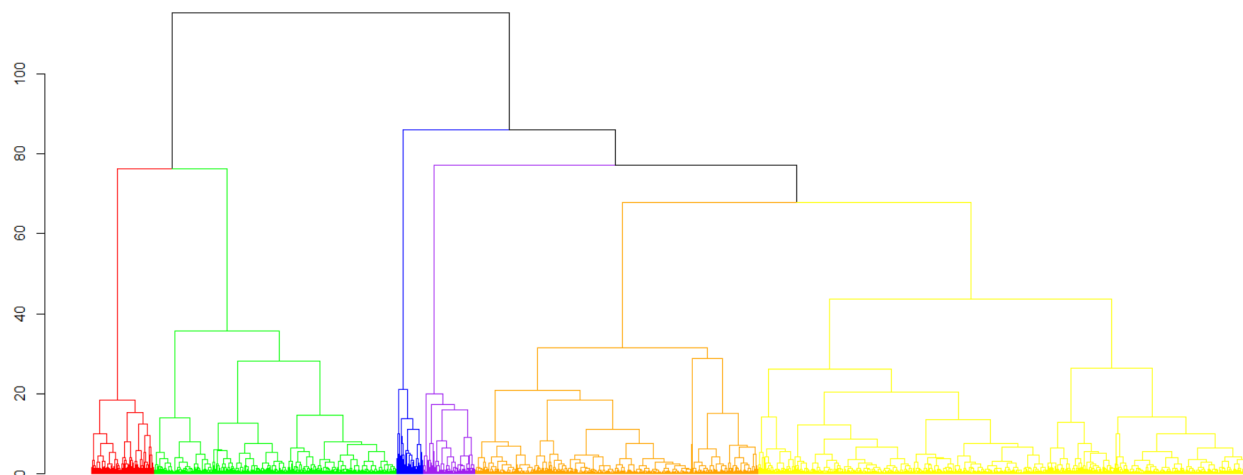


Figure 4.32 Dendrogramme obtenu de la classification des aires de diffusion selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les distributions des indicateurs pour les différents groupes sont représentées à la Figure 4.33.

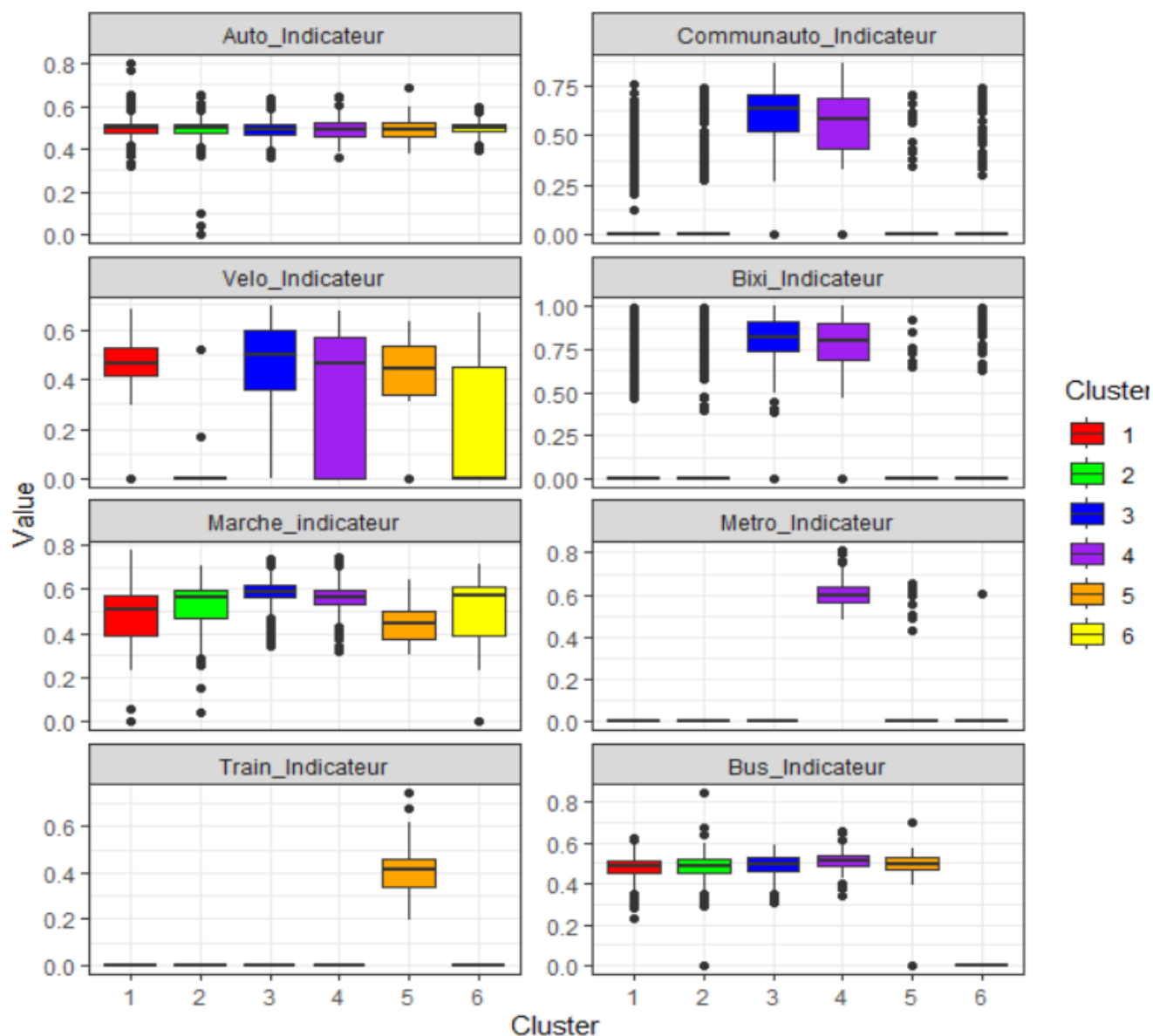


Figure 4.33 Distribution des indicateurs pour les différents groupes d'aires de diffusion

Le nombre d'aires de diffusion et la population totale par groupe sont montrés dans le Tableau 4.31. La majorité des aires de diffusion appartiennent aux groupes 1, 2 et 3. Les groupes 1 et 2 sont les zones périphériques non-desservies par le train de banlieue et le groupe 3 représente la plupart des zones centrales.

Tableau 4.31 Nombre d'aires de diffusion par groupe

Numéro du groupe	Nombre d'aires de diffusion appartenant au groupe	Population
1	1645	1045752
2	942	528312
3	807	469309
4	210	126151
5	88	60834
6	174	90282

La Figure 4.34 montre la distribution des groupes d'aires de diffusion.

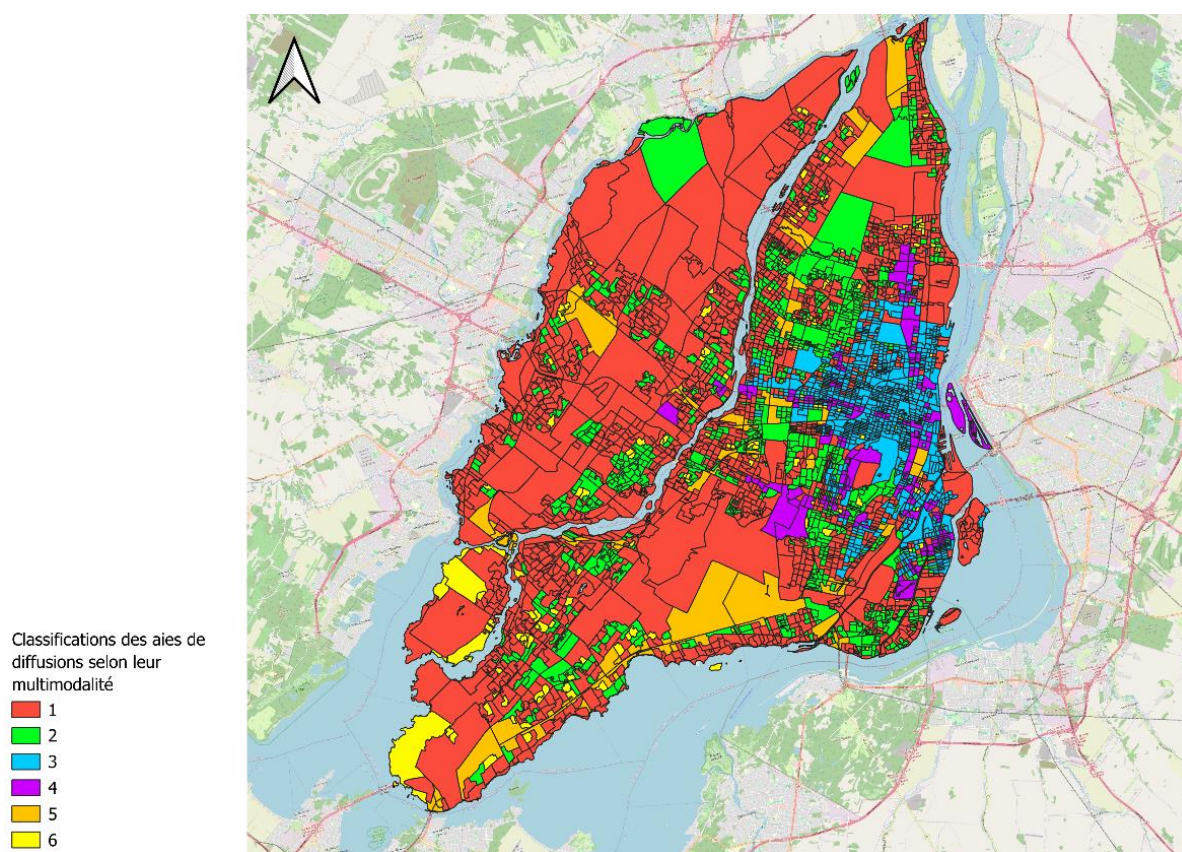


Figure 4.34 Distribution des groupes d'aires de diffusion classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales

En analysant et comparant les médianes des indicateurs pour les différents groupes, le tableau de catégorisation (Tableau 4.32) est obtenu. Cette classification permet d'obtenir une analyse plus fine de la multimodalité à travers le territoire.

Tableau 4.32 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe d'aires de diffusion obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Élevé	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Bas
2	Moyen	N/A	N/A	N/A	Moyen	N/A	N/A	Bas
3	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	N/A	Moyen
4	Bas	Bas	Moyen	Bas	Moyen	Élevé	N/A	Élevé
5	Bas	N/A	Moyen	N/A	Bas	N/A	Élevé	Moyen
6	Élevé	N/A	Bas	N/A	Moyen	N/A	N/A	N/A

Ces résultats sont résumés dans le Tableau 4.33. L'application de la méthode d'évaluation de la multimodalité se base sur ce tableau et permet de trouver l'ordre de multimodalité suivant.

Tableau 4.33 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les secteurs municipaux

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	1	2	1	4	4
2	1	2	0	3	6
3	0	2	4	6	2
4	3	2	2	7	1
5	2	2	1	5	3
6	1	1	1	3	5

Les groupes, du plus au moins multimodal sont : 4, 3, 5, 1, 6, 2.

Les zones des groupes 2 et 6 semblent être assez proches géographiquement et inclure les zones périphériques. Ces deux groupes sont desservis par le même nombre de modes, avec l'automobile privée et la marche étant les modes qu'ils ont en commun. Mais comme le groupe 6 a un score élevé pour l'automobile privée et que le groupe 4 n'a aucun mode avec un score élevé, c'est le groupe 6 qui est donc plus multimodal que le groupe 4. Les zones du groupe 1 qui représente la

majorité des zones périphériques sont desservies par tous les modes qui desservent les groupes 2 et 6, donc quatre au total, rendant ce groupe plus multimodal que les deux groupes précédents. Le groupe 5 représente le reste des zones périphériques et est le plus multimodal parmi celles-ci puisqu'il est en plus desservi par le train de banlieue. Comparé au groupe 1, il a des scores plus bas pour l'automobile privée et la marche mais meilleur pour le bus. Les zones centrales sont dans les groupes 3 et 4, et elles sont les plus multimodales car elles présentent le plus de modes. Les mêmes modes desservent ces deux groupes à l'exception du métro qui n'est présent que dans les zones du groupe 4, le rendant le plus multimodal. Il est quand même intéressant de noter qu'aucun mode dans le groupe 3 n'a de score bas alors que c'est le cas pour trois modes dans le groupe 4 et que le groupe 3 a deux modes avec un score élevé de plus que le groupe 4.

#### 4.2.4 Grille équivalente aux secteurs de recensement

Huit paires d'indicateurs calculés pour la grille équivalente aux secteurs de recensement sont significativement corrélées (Tableau 4.34), confirmant l'importance du traitement des données avant de procéder à la segmentation (Sambandam, 2003).

Tableau 4.34 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux secteurs de recensement

	<b>Automobile privée</b>	<b>Autopartage</b>	<b>Vélo privé</b>	<b>Vélopartage</b>	<b>Marche</b>	<b>Métro</b>	<b>Train de banlieue</b>	<b>Bus</b>
Automobile privée	1.00	0.49	-0.16	0.52	0.84	0.37	0.34	0.77
Autopartage		1.00	-0.19	0.73	0.57	0.41	0.17	0.38
Vélo privé			1.00	-0.02	-0.18	0.02	-0.02	-0.10
Vélopartage				1.00	0.54	0.40	0.10	0.51
Marche					1.00	0.44	0.25	0.85
Métro						1.00	-0.22	0.32
Train de banlieue							1.00	0.27
Bus								1.00

L'analyse en composantes principales produits huit composantes; elles sont présentées au Tableau 4.35.

Tableau 4.35 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Automobile privée	0.40	-0.36	-0.05	-0.25	-0.02	-0.71	0.14	-0.34
Autopartage	0.39	0.43	-0.02	0.04	0.28	0.00	-0.70	-0.32
Vélo privé	0.23	-0.38	-0.21	0.87	-0.04	0.01	-0.07	0.02
Vélopartage	0.36	0.44	-0.01	0.17	0.48	-0.02	0.63	0.11
Marche	0.45	-0.21	-0.05	-0.26	0.06	0.03	-0.22	0.79
Métro	0.33	0.43	0.04	0.08	-0.82	-0.05	0.11	0.05
Train de banlieue	0.11	-0.13	0.97	0.15	0.03	-0.01	-0.03	0.01
Bus	0.42	-0.31	-0.04	-0.24	-0.06	0.70	0.17	-0.38

La proportion de la variabilité expliquée par chaque composante est montrée dans le Tableau 4.36. 90% de la variabilité est expliquée par les quatre premières composantes, qui sont alors retenues pour la classification.

Tableau 4.36 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Écart-type	2.00	1.25	0.98	0.83	0.62	0.43	0.36	0.29
Proportion de la variabilité	0.50	0.20	0.12	0.09	0.05	0.02	0.02	0.01
Proportion cumulative	0.50	0.70	0.82	0.90	0.95	0.97	0.99	1.00

Les graphes aux Figure 4.35 et Figure 4.36 illustrent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin, indiquant que le nombre optimal de groupes est de 8. Cependant, l'utilisation de 7 groupes est plus pratique et donne des scores comparables.

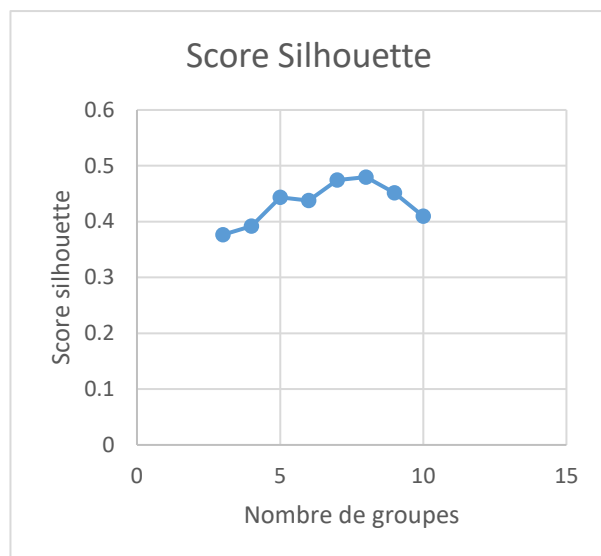


Figure 4.35 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

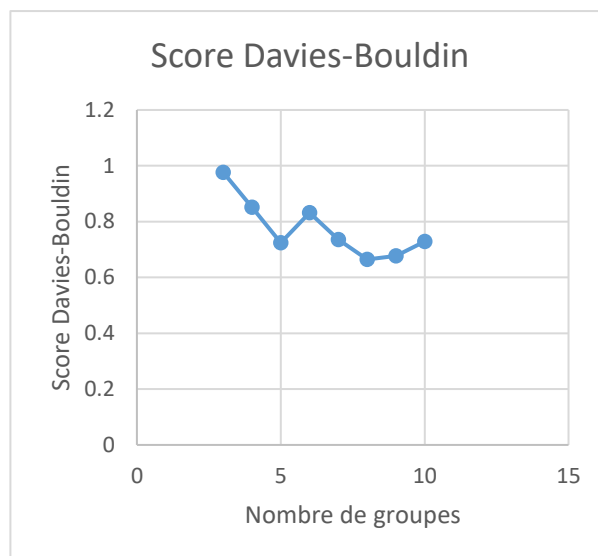


Figure 4.36 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes

Le dendrogramme est donc coupé pour produire 7 groupes, comme vu à la Figure 4.37.

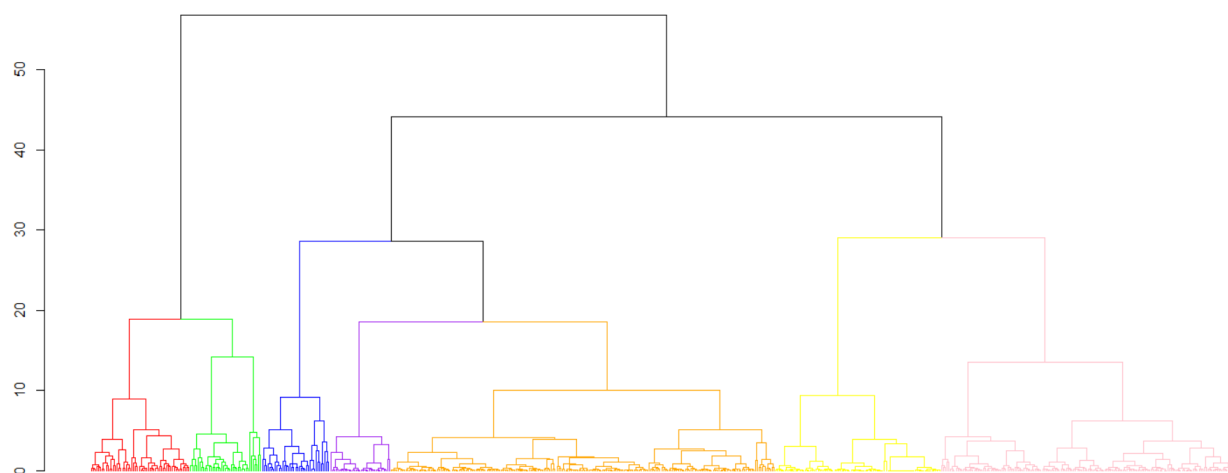


Figure 4.37 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les distributions des indicateurs sont présentées sous la forme de graphes en boîte à la Figure 4.38.

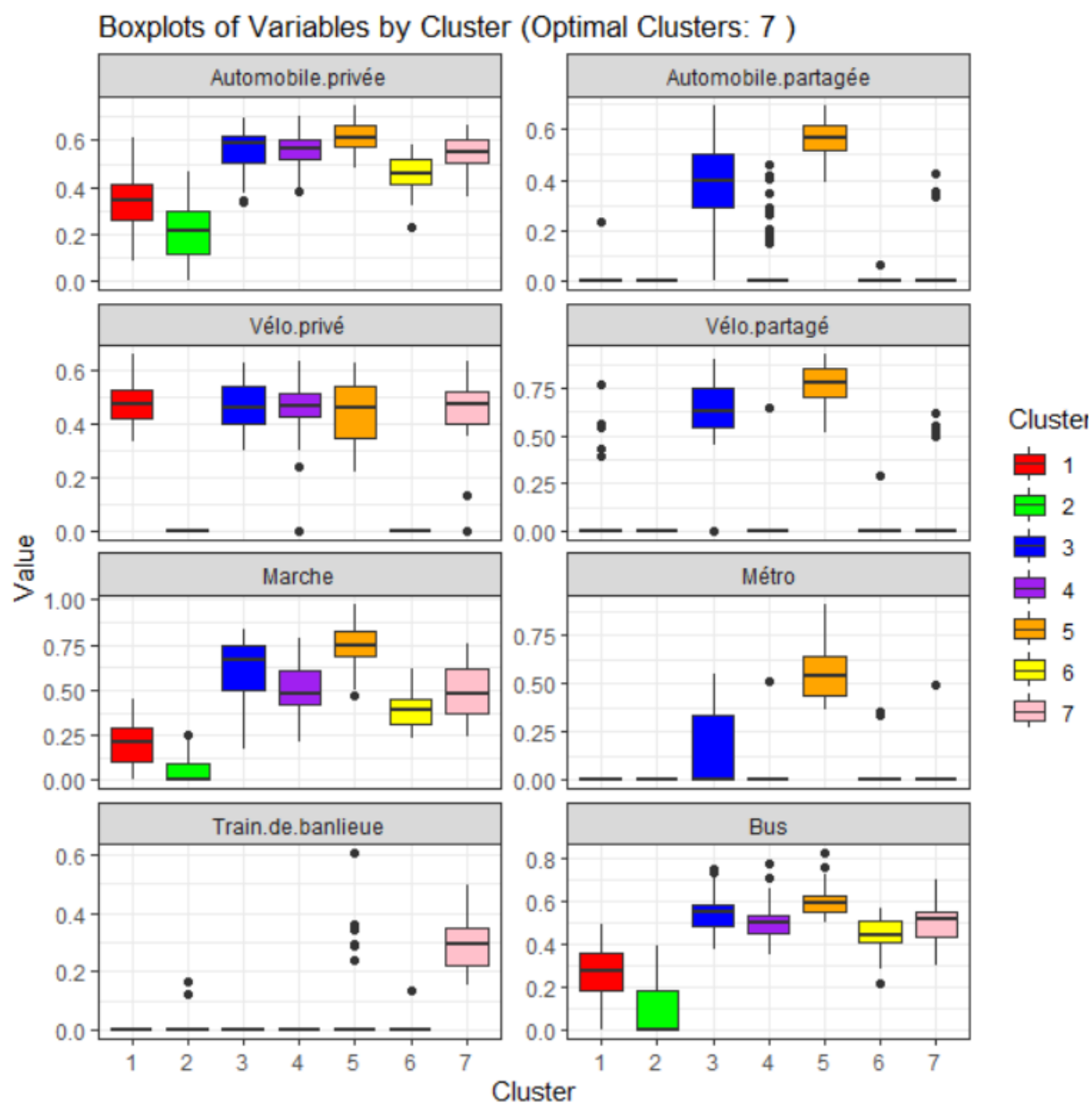


Figure 4.38 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.

Le nombre de zones par groupe et la population totale de ces groupes sont montrés dans le Tableau 4.37. La majorité des zones appartient aux groupes 1,4 et 2, qui sont des zones périphériques.

Tableau 4.37 Nombre de divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement dans chaque groupe

Numéro du groupe	Nombre de divisions appartenant au groupe	Population
1	161	174464.7
2	90	19194.3
3	54	456293.9
4	209	993123.2
5	39	463827.4
6	33	39901.2
7	37	173672.9

La carte à la Figure 4.39 montre la distribution des groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.

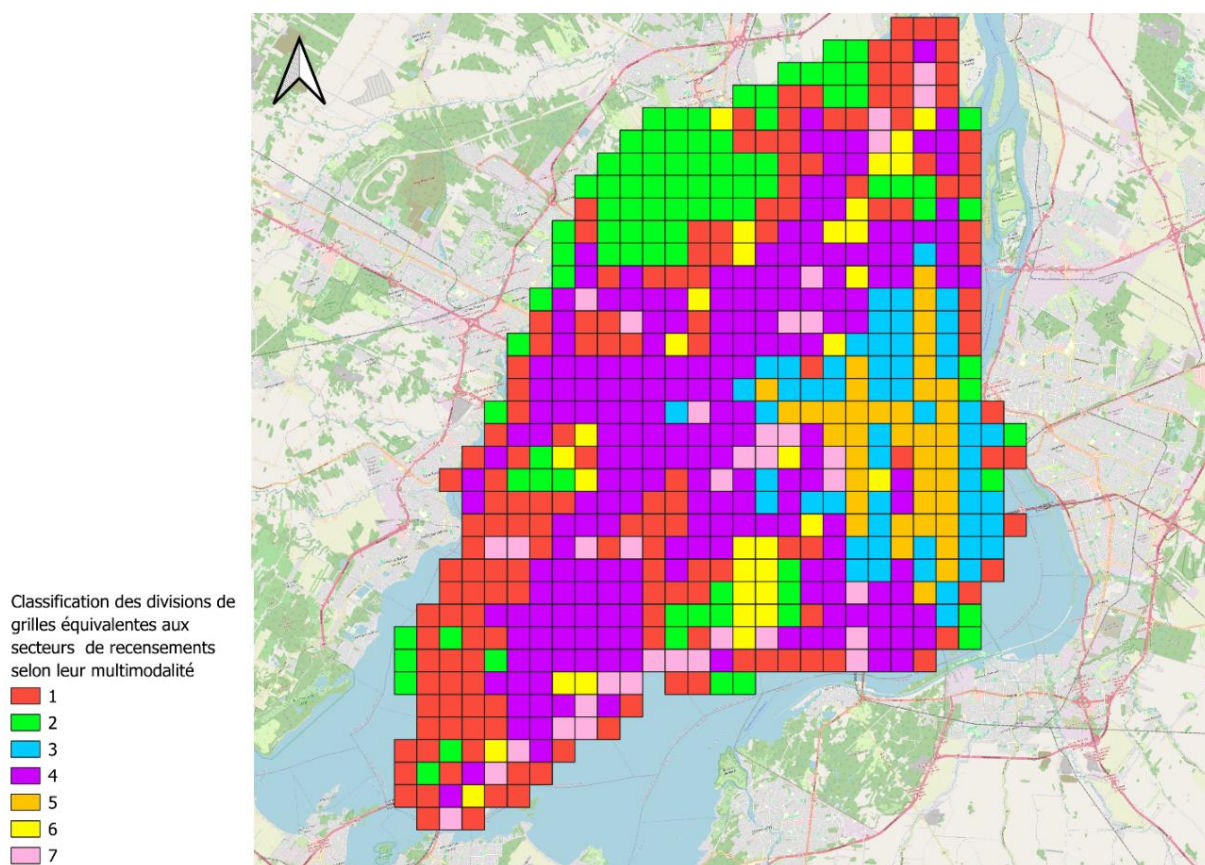


Figure 4.39 Distribution des groupes de divisions classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les caractéristiques des indicateurs pour les groupes sont résumées dans le Tableau 4.38. Ces résultats sont résumés numériquement dans Tableau 4.39.

Tableau 4.38 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de divisions obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
2	Bas	N/A	N/A	N/A	Bas	N/A	N/A	Bas
3	Moyen	Bas	Bas	Bas	Élevé	Bas	N/A	Moyen
4	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
5	Élevé	Élevé	Bas	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Élevé
6	Moyen	N/A	N/A	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
7	Moyen	N/A	Élevé	N/A	Moyen	N/A	Élevé	Moyen

Tableau 4.39 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	0	4	0	4	5
2	3	0	0	3	7
3	3	2	1	6	2
4	0	4	0	4	4
5	1	0	6	7	1
6	0	3	0	3	6
7	0	3	2	5	3

Les groupes des plus au moins multimodaux sont : 5, 3, 7, (1 et 4), 6 et 2. Les groupes 1 et 4 ont le même nombre de modes pour toutes les catégories. Pour y remédier les scores médians pour ces modes sont comparés dans le Tableau 4.40.

Tableau 4.40 Comparaisons des valeurs médianes des indicateurs pour les groupes 1 et 4.

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	0.346	0.000	0.470	0.000	0.211	0.000	0.000	0.274
4	0.568	0.000	0.469	0.000	0.481	0.000	0.000	0.498

Le groupe 4 a des valeurs supérieures pour 3 des 4 modes, il est donc plus multimodal que le groupe 1. Le classement final des groupes du plus au moins multimodal est le suivant : 5, 3, 7, 4, 1, 6 et 2.

Les groupes 6 et 2 sont desservis par les mêmes modes mais le groupe 6 a un score moyen pour tous les modes et le groupe 2 a un score bas pour tous les modes. Cette classification permet donc de distinguer entre des zones périphériques qui ont des niveaux d'offre différents. Les groupes 1 et 4 qui regroupent des zones adjacentes et périphériques (avec le groupe 1 étant plus périphérique que le groupe 4) sont desservis par les mêmes modes qui ont tous un score moyen. Une analyse plus fine des valeurs des médianes permet de trouver que la zone 4 est plus multimodale. Encore une fois cette segmentation permet de différencier entre des zones qui semblent être très similaires au premier abord. Le groupe 7 est le groupe desservi par le train de banlieue, qui comme pour tous les systèmes de divisions précédents se situe entre les autres zones périphériques et les zones centrales en termes de multimodalité. Les groupes 3 et 5 regroupent les zones centrales, qui sont, comme dans les sections précédentes, les plus multimodales. Dans cette classification les zones desservies par le métro sont aussi celles qui ont le plus grand nombre de modes avec un score élevé.

#### 4.2.5 Grille équivalente aux secteurs municipaux

Huit paires d'indicateurs calculés pour la grille équivalente aux secteurs municipaux sont significativement corrélés (Tableau 4.41). Le grand nombre de variable corrélées montre l'importance de traiter la base de données afin d'éviter la redondance lors de la classification (Sambandam, 2003).

Tableau 4.41 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux secteurs municipaux

Modes	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
Automobile privée	1.00	0.12	-0.89	-0.40	-0.05	0.48	0.49	0.83
Autopartage		1.00	0.27	-0.57	0.62	0.64	-0.08	-0.15
Vélo privé			1.00	0.27	0.15	-0.29	-0.32	-0.73
Vélopartage				1.00	-0.82	-0.93	0.11	-0.37

Tableau 4.41 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux secteurs municipaux (suite)

Modes	Automobile privée	Autopartag e	Vélo privé	Vélopa rtage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
Marche					1.00	0.75	0.34	0.25
Métro						1.00	-0.19	0.39
Train de banlieue							1.00	0.63
Bus								1.00

L'analyse en composantes principales produits les huit composantes présentées dans le Tableau 4.42.

Tableau 4.42 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux

Indicateurs	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Automobile privée	0.27	-0.54	-0.05	0.37	-0.01	-0.11	0.69	0.04
Autopartage	0.46	0.22	-0.16	0.12	0.08	-0.31	-0.09	-0.77
Vélo privé	-0.10	0.50	0.51	0.66	-0.13	0.07	0.13	0.03
Vélopartage	0.41	0.21	-0.11	0.12	0.77	0.19	-0.06	0.36
Marche	0.37	0.37	-0.03	-0.40	-0.32	0.52	0.43	-0.03
Métro	0.45	0.16	-0.10	0.01	-0.43	-0.52	0.11	0.05
Train de banlieue	0.24	-0.19	0.82	-0.40	0.17	-0.20	-0.03	0.01
Bus	0.36	-0.40	0.11	0.28	-0.26	0.52	0.17	-0.38

La proportion de la variabilité expliquée par chaque composante est montrée dans le Tableau 4.43. 86% de la variabilité est expliquée par les trois premières composantes, qui sont alors retenues pour la classification.

Tableau 4.43 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8
Écart-type	2.00	1.41	0.94	0.70	0.59	0.43	0.30	0.16
Proportion de la variabilité	0.50	0.25	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.00
Proportion cumulative	0.50	0.75	0.86	0.92	0.96	0.99	1.00	1.00

Les graphes aux Figure 4.40 et Figure 4.41 montrent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin. Le score Silhouette a une valeur beaucoup plus élevée pour 4 groupes que pour les autres nombres. Le score Davies-Bouldin montre des valeurs assez proches pour des groupes de 4,5 et 6. Le nombre de groupes sélectionné est alors 4.

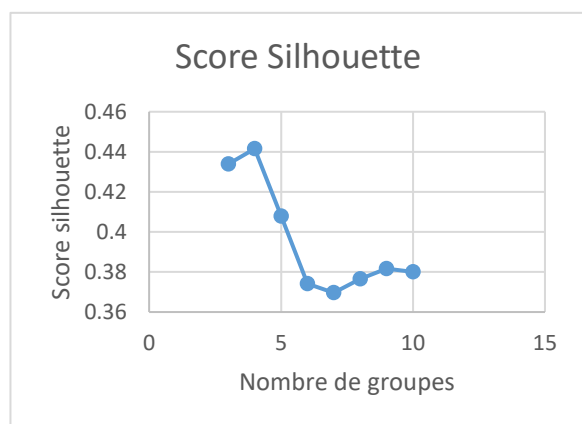


Figure 4.40 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

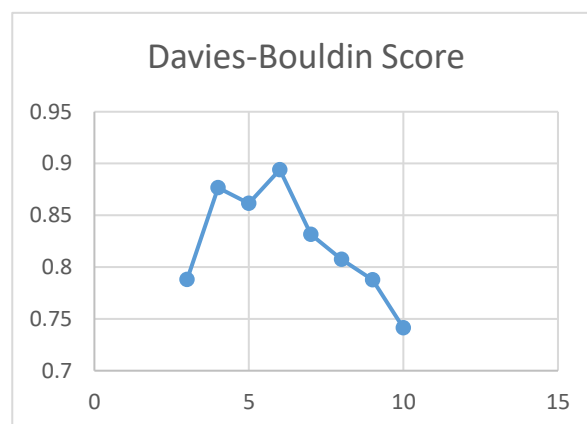


Figure 4.41 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes

Le dendrogramme avec les 7 groupes marqués est présenté à la Figure 4.42.

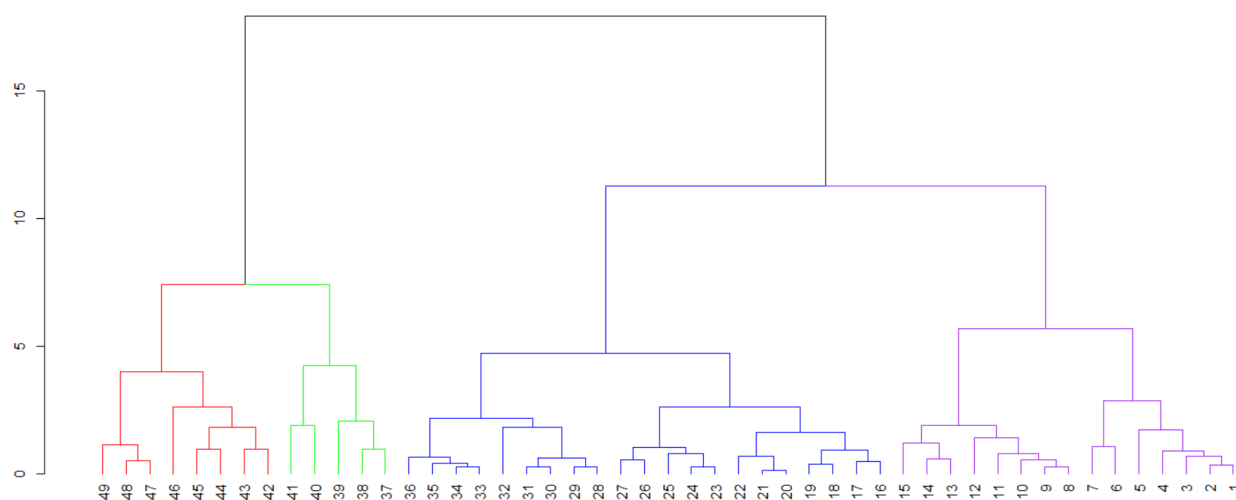


Figure 4.42 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les variations des indicateurs pour chaque groupe sont montrées dans les graphes en boîte présentés à la Figure 4.43.

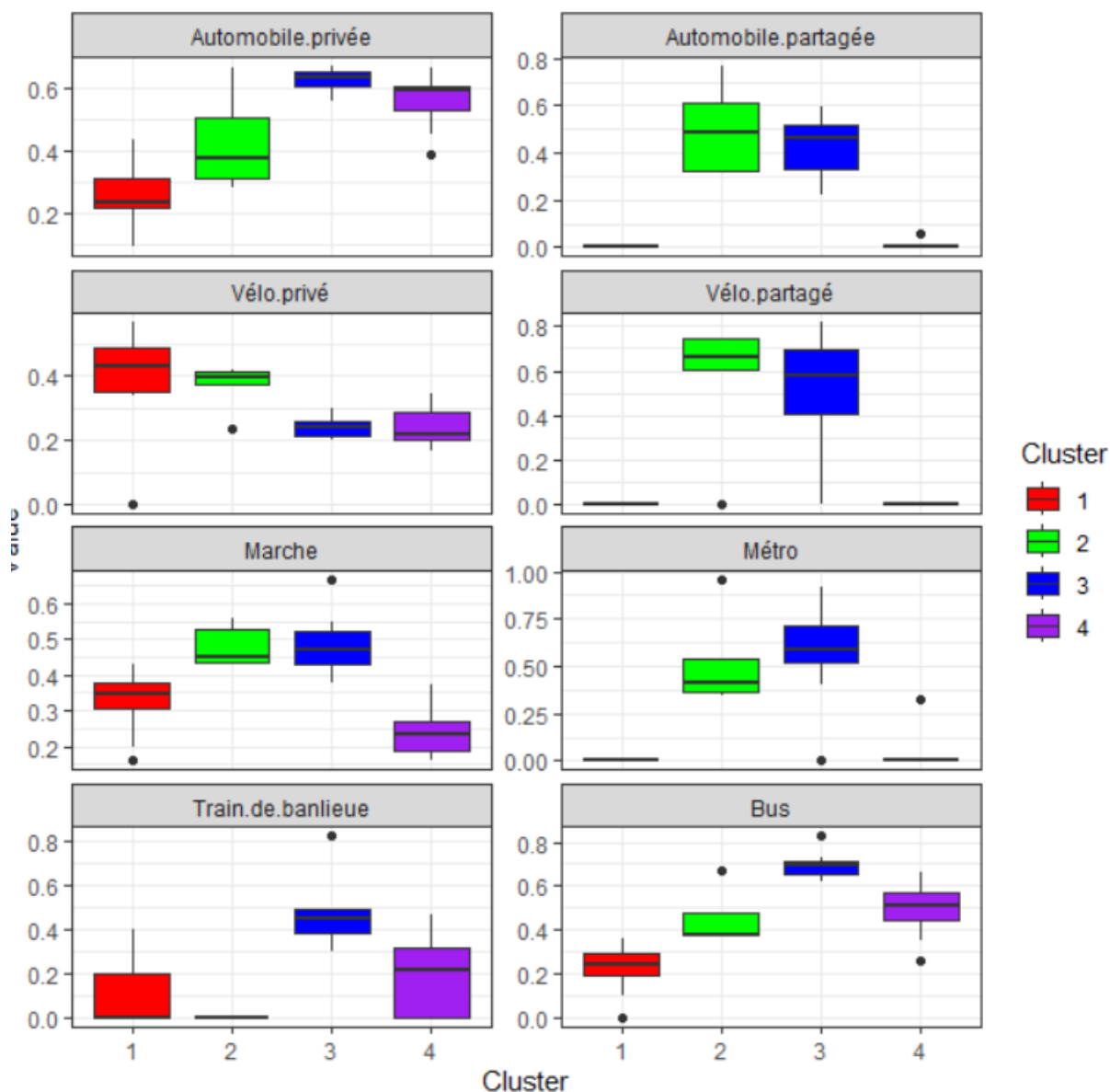


Figure 4.43 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux

Les groupes 1, 2, 3 et 4 contiennent respectivement 15, 5, 8 et 21 divisions et ont une population totale de 166782.9, 395240.1, 983778.2, 772884.5 respectivement. Leur répartition spatiale peut être visualisée à la Figure 4.44. La majorité des zones sont incluses dans les groupes 1 et 4 qui sont périphériques.

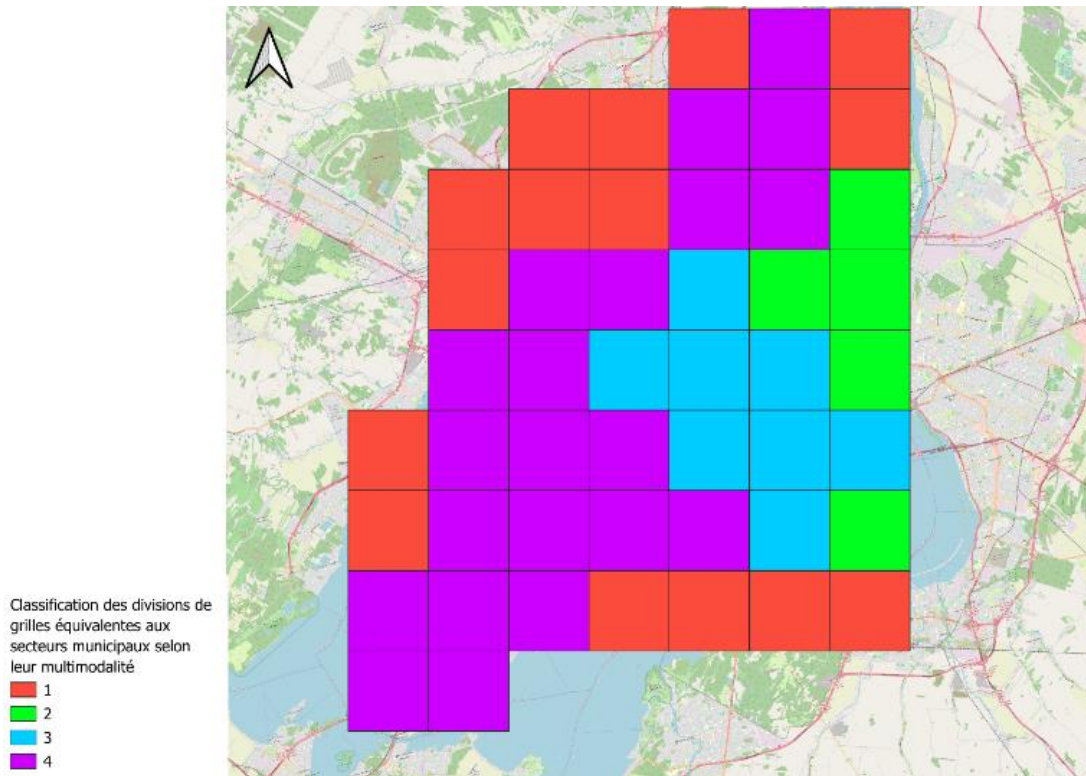


Figure 4.44 Distribution des groupes de divisions de la grille équivalente aux secteurs municipaux classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les résultats des analyses et comparaisons des médianes des indicateurs pour les différents modes et groupes sont présentés dans le Tableau 4.43. Le Tableau 4.44 permet de résumer ces résultats afin de procéder à l'évaluation de la multimodalité.

Tableau 4.43 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de la grille équivalente aux secteurs municipaux obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Bas	N/A	Élevé	N/A	Bas	N/A	Bas	Bas
2	Bas	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Moyen
3	Élevé	Bas	Bas	Bas	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé
4	Élevé	N/A	Bas	N/A	Bas	N/A	Moyen	Moyen

Tableau 4.44 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	4	0	1	5	4
2	1	1	5	6	2
3	3	0	5	8	1
4	2	2	1	5	3

Les groupes de zones, des plus au moins multimodaux sont : 3, 2, 4, 1.

Les groupes 1 et 4 sont desservis par les mêmes modes mais le groupe 1 a des scores bas pour tous les modes sauf le vélo privé et le groupe 4 a un mode qui a un score élevé et deux modes qui ont un score moyen, le rendant plus multimodal que le groupe 4. Les zones du groupe 2 sont desservies par tous les modes sauf le train de banlieue et les zones du groupe 1 sont desservies par tous les modes avec cinq modes ayant des scores élevés. Les deux sont desservis par le métro mais seulement un des deux est desservi par le train de banlieue. Puisque les zones ont des superficies très importantes, la même structure de zones périphériques peu multimodales, suivie de zones périphériques desservi par le train de banlieue puis de zones centrales très multimodale n'est pas retrouvée pour ce système de divisions.

#### 4.2.6 Grille équivalente aux aires de diffusion

Trois paires d'indicateurs calculés pour la grille équivalente aux aires de diffusion sont significativement corrélées (Tableau 4.45), confirmant l'importance de traiter la base de données pour éviter la redondance lors de la segmentation (Sambandam, 2003).

Tableau 4.45 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux aires de diffusion

	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
Automobile privée	1.00	0.26	0.24	0.34	0.73	0.28	0.21	0.45
Autopartage		1.00	0.09	0.27	0.34	0.05	-0.37	0.07
Vélo privé			1.00	0.55	0.28	0.10	-0.15	0.18
Vélopartage				1.00	0.40	0.19	0.35	0.15
Marche					1.00	0.32	0.29	0.51

Tableau 4.45 Corrélations entre les indicateurs pour la grille équivalente aux aires de diffusion (suite)

	<b>Automobile privée</b>	<b>Autopartage</b>	<b>Vélo privé</b>	<b>Vélopartage</b>	<b>Marche</b>	<b>Métro</b>	<b>Train de banlieue</b>	<b>Bus</b>
Métro						1.00	0.38	0.20
Train de banlieue							1.00	0.32
Bus								1.00

L'analyse en composantes principales produits les huit composantes présentées dans le Tableau 4.46.

Tableau 4.46 Composition des nouvelles composantes pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

<b>Indicateurs</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>	<b>PC8</b>
Automobile privée	0.41	-0.40	-0.01	0.19	-0.03	0.58	0.16	-0.53
Autopartage	0.37	0.46	0.12	-0.07	-0.39	0.05	-0.66	-0.21
Vélo privé	0.33	-0.10	0.12	-0.75	0.54	-0.01	-0.10	-0.01
Vélopartage	0.38	0.47	0.13	-0.16	-0.26	-0.03	0.72	0.07
Marche	0.46	-0.28	0.01	0.17	-0.11	0.19	-0.13	0.79
Métro	0.25	0.45	-0.23	0.49	0.66	0.01	-0.03	0.00
Train de banlieue	0.07	0.01	-0.95	-0.25	-0.18	0.02	0.01	0.00
Bus	0.41	-0.34	-0.03	0.19	-0.06	-0.79	0.02	-0.22

La proportion de la variabilité expliquée par chaque composante est montrée dans le Tableau 4.47. 84% de la variabilité est expliquée par les quatre premières composantes, qui sont alors retenues pour la classification.

Tableau 4.47 Proportion de la variabilité des données expliquée par chaque composante pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>	<b>PC5</b>	<b>PC6</b>	<b>PC7</b>	<b>PC8</b>
Écart-type	1.89	1.19	1.01	0.84	0.78	0.56	0.43	0.40
Proportion de la variabilité	0.45	0.18	0.13	0.09	0.08	0.04	0.02	0.02
Proportion cumulative	0.45	0.63	0.75	0.84	0.92	0.96	0.98	1.00

Les graphes des Figure 4.45 et Figure 4.46 présentent la variation des scores Silhouette et Davies-Bouldin, qui montrent que le nombre optimal de groupes est 5.

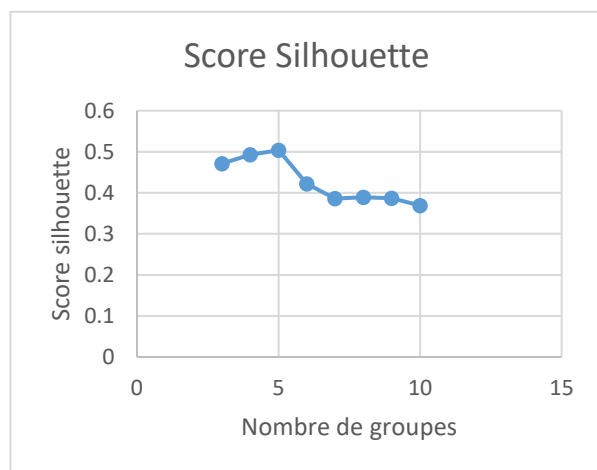


Figure 4.45 Variation du score Silhouette selon le nombre de groupes

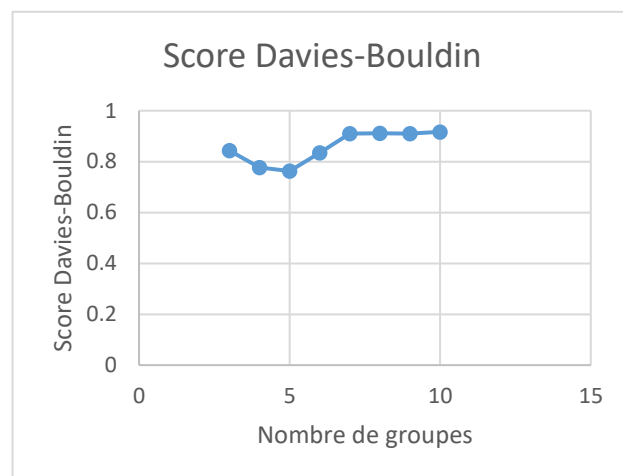


Figure 4.46 Variation du score Davies-Bouldin selon le nombre de groupes

Le dendrogramme avec les 5 groupes marqués est présenté à la Figure 4.47.

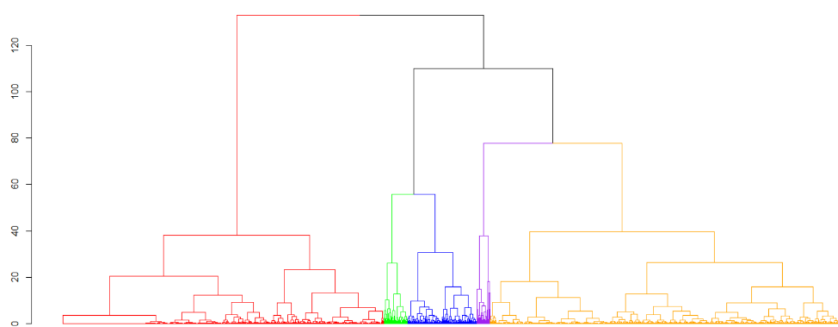


Figure 4.47 Dendrogramme obtenu de la classification des divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les variations des indicateurs pour les différents groupes sont présentées à la Figure 4.48.

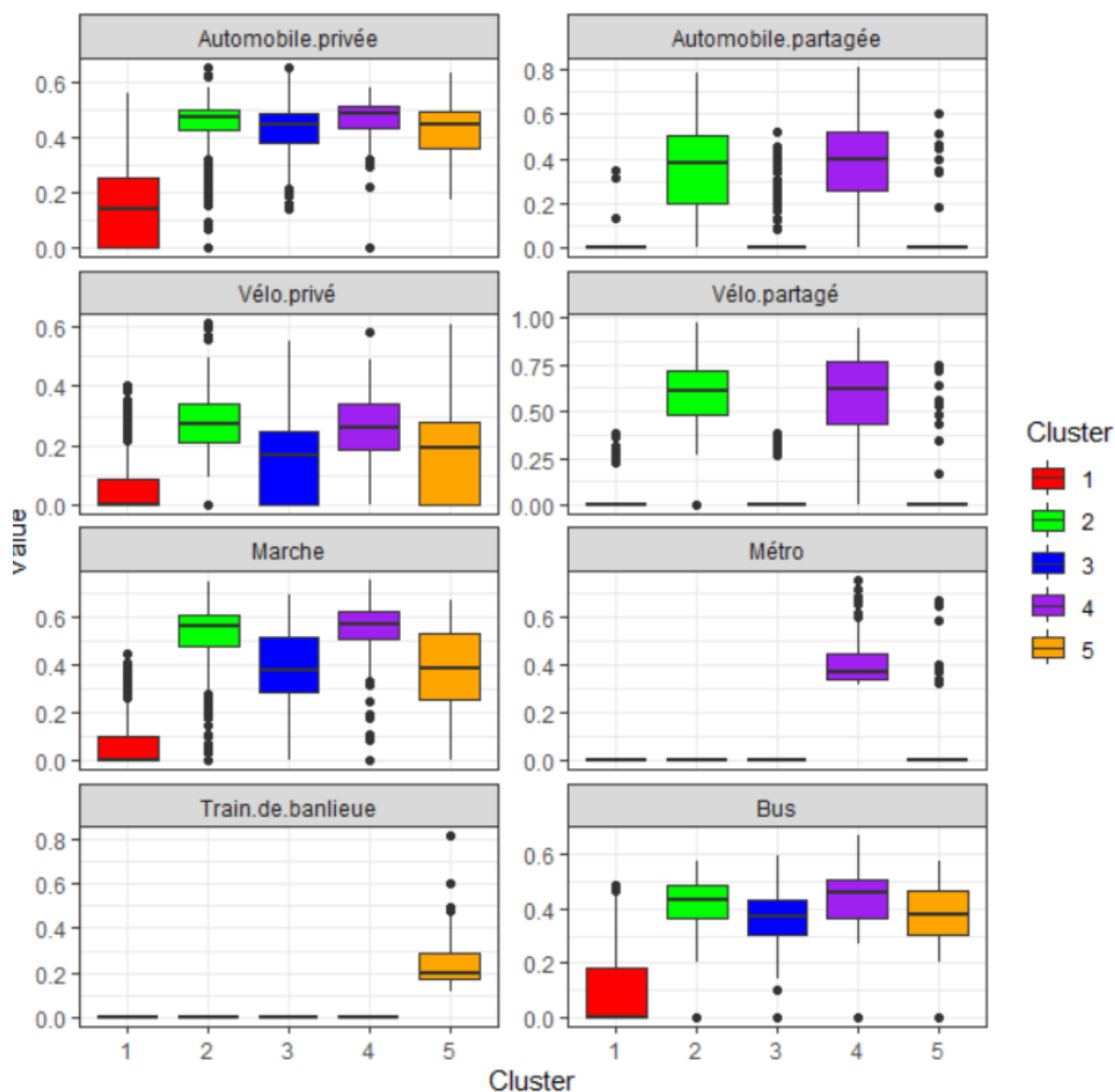


Figure 4.48 Distribution des indicateurs pour les différents groupes de divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

Les groupes 1, 2, 3, 4 et 5 incluent respectivement, 1599, 345, 1738, 118 et 66 divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion et ont une population totale de 191466.3, 608335.5, 1271905.2, 204531.2, 44396.9 respectivement. Les groupes 1 et 3 incluent la majorité des zones et sont périphériques. Leur répartition spatiale est présentée à la Figure 4.49.

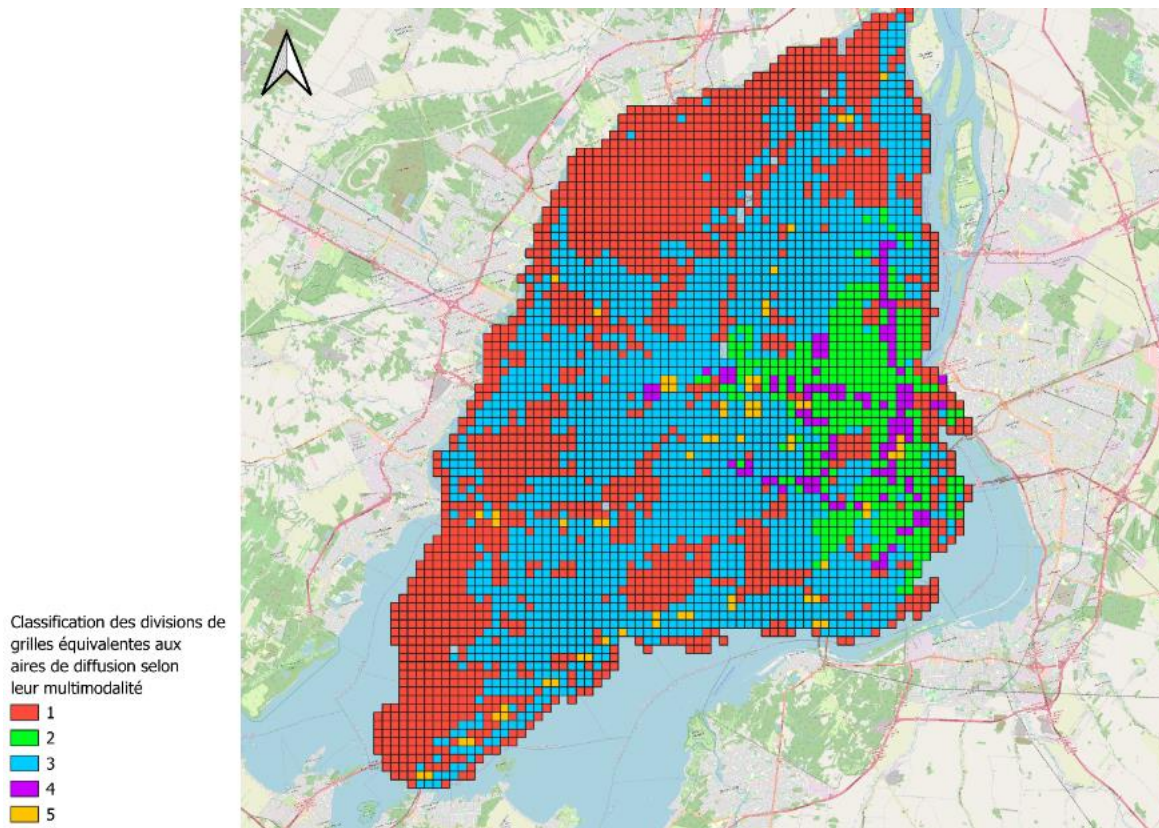


Figure 4.49 Distribution des groupes de divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion classifiés selon les variables de l'analyse en composantes principales

Les caractéristiques de ces groupes sont résumées dans le Tableau 4.48. Le nombre de modes dans chaque catégorie est ensuite compté et présenté dans le Tableau 4.49.

Tableau 4.48 Catégorisation du niveau des modes pour chaque groupe de la grille équivalente aux aires de diffusion obtenu avec les indicateurs de l'analyse en composantes principales

Groupe	Automobile privée	Autopartage	Vélo privé	Vélopartage	Marche	Métro	Train de banlieue	Bus
1	Bas	N/A	Bas	N/A	Bas	N/A	N/A	Bas
2	Élevé	Bas	Élevé	Bas	Élevé	N/A	N/A	Élevé
3	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	N/A	Moyen
4	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	Élevé	N/A	Élevé
5	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Moyen	N/A	Élevé	Moyen

Tableau 4.49 Nombre de modes par catégorie par groupe pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement.

Groupe	Nombre de modes avec un score bas	Nombre de modes avec un score moyen	Nombre de modes avec un score élevé	Nombre de modes total	Rang de multimodalité
1	4	0	0	4	5
2	2	0	4	6	2
3	0	4	0	4	4
4	0	0	7	7	1
5	0	4	1	5	3

Les groupes de zones, des plus au moins multimodaux sont : 4, 2, 5, 3, 1.

Les groupes 1 et 3 regroupent des zones adjacentes et périphériques. Ils sont desservis par les mêmes modes, mais ces modes ont un score bas pour le groupe 1 et moyen pour le groupe 3. Le groupe 5 inclut les zones périphériques desservies par le train de banlieue. À l'exception du train, elles sont desservies par les mêmes modes que les zones du groupe 3 avec les mêmes scores. Les zones des groupes 2 et 4 sont les zones centrales. Le groupe 4 est desservi par le métro et présente un score élevé pour tous les modes alors que le groupe 2 ne l'est pas et présente des scores bas pour les modes partagés. Il est intéressant de remarquer que pour ce système de division, le nombre de modes avec scores élevés augmente quand il y a plus de modes.

#### 4.2.7 Discussion des résultats

Il est notable que pour les aires de diffusion, leurs grilles équivalentes et les secteurs de recensement, il y a une séparation entre les zones où le métro et le train de banlieue sont disponibles et celles où ils ne le sont pas. Les autres divisions présentent des zones avec deux scores nettement différents pour ces modes. Il pourrait être intéressant de distinguer entre les zones où le métro a un score moins élevé par exemple. Cependant, il est également pertinent, pour mesurer spécifiquement la multimodalité, de considérer les zones où il y a un mode structurant comme le métro ou le train de banlieue séparément, vu que l'offre dans ces zones se ressemble plus qu'elle ne ressemble à celle d'autres zones où ces modes ne sont pas disponibles.

De plus pour les grilles et les secteurs de recensement, il semble que le nombre de modes à scores élevés augmente avec le nombre de modes total indiquant que les zones qui sont desservies par

plus de modes sont généralement mieux desservies par ces modes. Mais cela n'est pas vrai pour les aires de diffusion et les secteurs municipaux.

Plusieurs similarités ressortent en comparant la multimodalité des zones dans toutes les divisions. Les mêmes types de zones se démarquent et sont ordonnées de manière similaire. Toutes les divisions, sauf la grille équivalente aux secteurs municipaux, permettent d'identifier les types de zones suivants, classées des plus multimodales aux moins multimodales :

- Zones centrales desservies par le métro, avec des niveaux très élevés pour la majorité des modes de transport.
- Zones centrales mal ou non desservies par le métro, mais avec des niveaux très élevés pour de nombreux modes.
- Zones périphériques desservies par le train de banlieue.
- Zones à l'est de Montréal et au centre de Laval, avec des niveaux bas ou moyens pour la majorité des modes.
- Zones à l'extrémité des deux îles, avec des scores bas pour presque tous les modes de transport.

Des types zones plus ou moins spécifiques que ceux mentionnés apparaissent selon le nombre de groupes. En effet, ces types de zones sont moins distincts pour les secteurs municipaux et leurs grilles équivalentes en raison du faible nombre de divisions, mais les mêmes tendances générales apparaissent. Il est aussi notable que plus les divisions sont fines, moins les types de zones définis sont homogènes au niveau de la répartition spatiale, ce qui est attendu en raison du niveau de détail accru.

Globalement, même si les distributions des indicateurs ne sont les mêmes et sont très affectées par le niveau d'agrégation spatiale, comme il sera démontré dans le Chapitre 5, en comparant les indicateurs entre les différentes zones, l'image globale de la multimodalité qui ressort est très cohérente.

## CHAPITRE 5 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES RÉSULTATS SELON LE DÉCOUPAGE CHOISI

Dans le but d'étudier l'effet du niveau d'agrégation spatiale sur les indicateurs calculés, les distributions des indicateurs pour chaque mode sont comparées pour les différentes divisions. Pour étudier l'effet zonal, les distributions pour les aires de diffusion, les secteurs de recensement et les secteurs municipaux sont comparées à celles de leurs grilles équivalentes, respectivement. Pour étudier l'effet d'échelle, les distributions pour les aires de diffusion sont comparées à celles des secteurs de recensement, et celles des secteurs de recensement sont comparés à celles des secteurs municipaux. Les mêmes comparaisons seront faites pour les grilles équivalentes.

### 5.1 Effet zonal

Cette partie présente les comparaisons des distributions des indicateurs pour les divisions du recensement et municipales et leurs grilles équivalentes, afin d'évaluer l'effet de l'agrégation spatiale.

#### 5.1.1 Comparaison des distributions des indicateurs pour les aires de diffusion et la grille équivalente

Les résultats des test statistiques Mann-Whitney U et Kolmogorov–Smirnov pour les différents indicateurs sont présentés dans le Tableau 5.1. Dans ce tableau « 1 » veut dire que la différence entre les distributions a été trouvée significative par le test et « 0 » veut dire qu'il n'y a pas de différences significatives qui ont été détectées.

Tableau 5.1 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et la grille équivalente

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	1	1
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	1	1
Marche	1	1
Métro	1	1
Train	1	1
Bus	1	1

Les tests statistiques utilisés montrent que les différences entre les distributions sont toutes significatives.

Les graphes quantile-quantile sont présentés à la Figure 5.1. De gauche à droite, et de haut en bas, les différents quadrants représentent les modes suivants : l'automobile privée, l'autopartage, le vélo privé, le vélopartage, la marche, le métro, le train de banlieue et le bus.

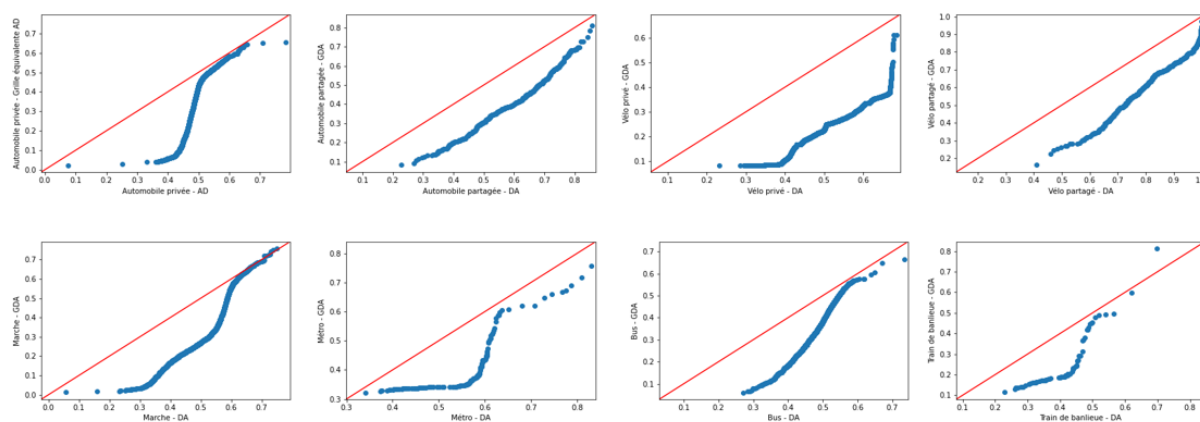


Figure 5.1 Graphiques q-q des distributions pour les aires de diffusion et la grille équivalente

Les graphiques quantile-quantile confirment les résultats des tests statistiques. En effet, les droites représentatives des quantiles des deux groupes de divisions considérées dévient de la droite de 45 degrés.

Les distributions des indicateurs sont ensuite comparées à l'aide des graphiques de densité présentés à la Figure 5.2.

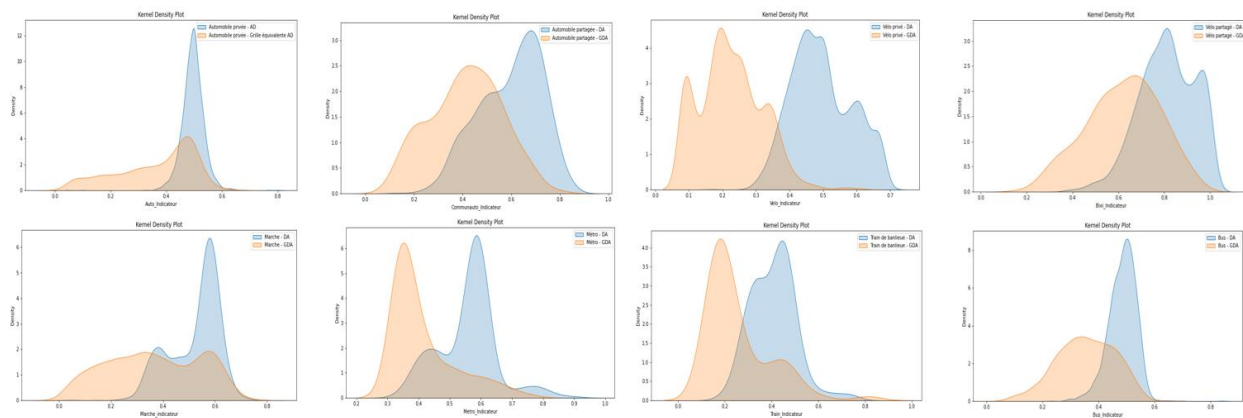


Figure 5.2 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les aires de diffusion et la grille équivalente

Ces graphes montrent des distributions très distinctes pour tous les indicateurs, avec des pics pour des valeurs d'indicateurs plus élevées pour les aires de diffusion. Cela indique que les aires de diffusion comptent davantage de divisions avec des valeurs d'indicateurs élevées comparativement aux divisions de la grille équivalente. Ces différences significatives dans les distributions des indicateurs peuvent être expliquées par la variation de taille des aires de diffusion, qui sont plus petites dans les zones les plus densément peuplées, notamment près du centre-ville. En effet, en s'éloignant du centre-ville, les aires de diffusion deviennent plus grandes. Les résultats montrent clairement (comme il a été démontré dans le chapitre précédent) que les zones proches du centre de l'île de Montréal tendent à avoir des valeurs d'indicateurs plus élevées que celles en périphérie. Cela explique donc la surreprésentation des grandes valeurs d'indicateurs pour les aires de diffusion dans la plupart des cas, et pourquoi la distribution des valeurs est si différente.

### 5.1.2 Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de recensement et la grille équivalente

Les résultats des tests statistiques, présentés au Tableau 5.2, montrent que les distributions des différents indicateurs sont significativement différentes.

Tableau 5.2 Résultats des test statistiques pour les secteurs de recensement et la grille équivalente

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	1	1
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	1	1
Marche	1	1
Métro	1	1
Train	1	1
Bus	1	1

Les graphes quantile-quantile à la Figure 5.3 confirment ces résultats, mais il est notable que les droites sont plus proches de la diagonale à 45 degrés pour les secteurs de recensement, suggérant que les distributions des secteurs de recensement et de leur grille équivalente sont plus similaires que celles des aires de diffusion et de leur grille équivalente.

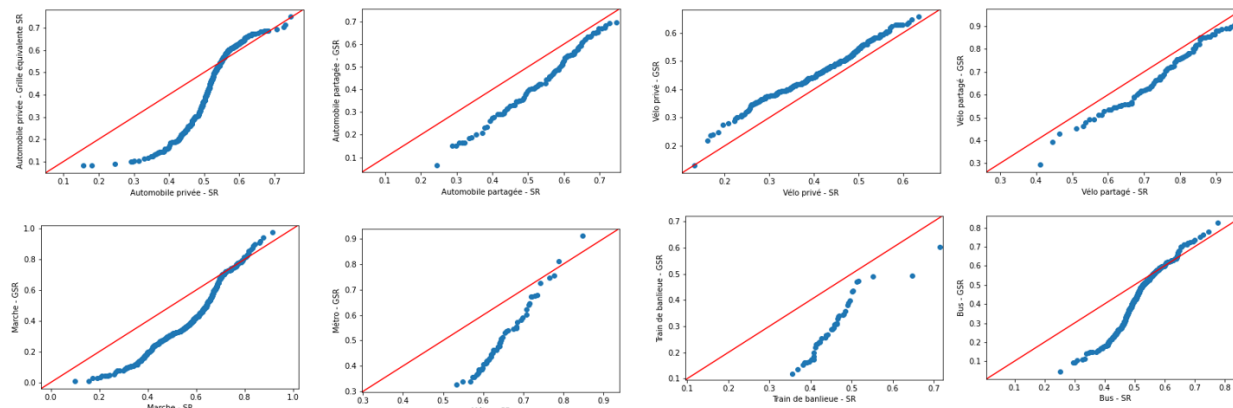


Figure 5.3 Graphiques q-q des distributions pour les secteurs de recensement et la grille équivalente

Ces constats sont confirmés par les graphes de densité (Figure 5.4) qui montrent des distributions très différentes. Le même phénomène de valeurs généralement plus élevées pour les secteurs de recensement est observé. Cela peut être expliqué par le même raisonnement que pour les aires de diffusion, vu que les secteurs de recensement dans le centre, plus peuplés, sont plus petits que ceux en périphérie.

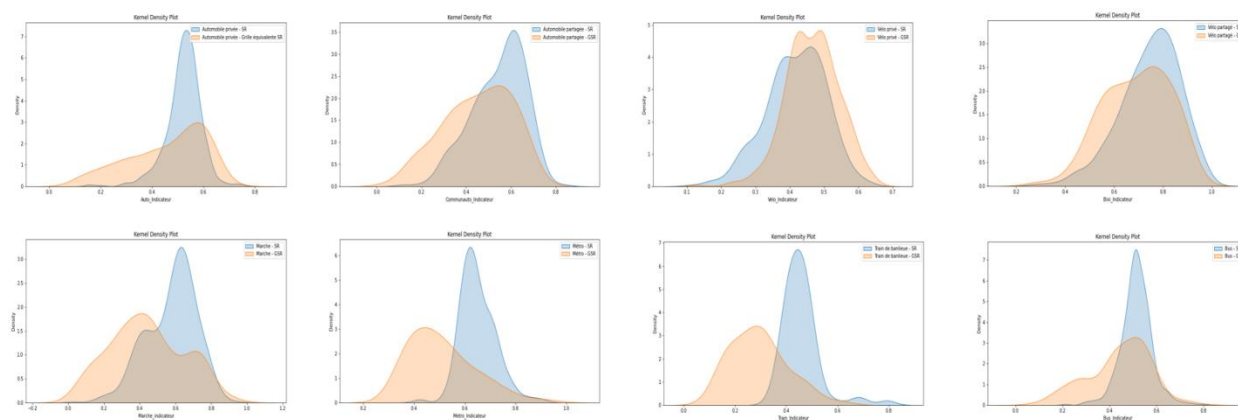


Figure 5.4 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et la grille équivalente

### 5.1.3 Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de municipaux et la grille équivalente

Les résultats de comparaison pour les secteurs municipaux et la grille équivalente, présentés dans le Tableau 5.3, ne sont pas uniformes pour tous les modes, contrairement aux divisions précédentes. Les tests statistiques présentés ci-dessous montrent qu'il n'y a pas de différences significatives pour l'autopartage, le vélopartage et le métro. En revanche, pour l'automobile privée, le test de

Kolmogorov-Smirnov détecte une différence significative entre les deux distributions, tandis que le test de Mann-Whitney U ne le fait pas. Inversement, pour le train de banlieue, le test de Mann-Whitney U trouve une différence significative, contrairement au test de Kolmogorov-Smirnov. Pour le vélo privé, la marche et le bus, les deux tests révèlent des différences significatives.

Tableau 5.3 Résultats des test statistiques pour les secteurs de recensement et la grille équivalente

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	0	1
Autopartage	0	0
Vélo privé	1	1
Vélopartage	0	0
Marche	1	1
Métro	0	0
Train	1	0
Bus	1	1

Les graphiques quantile-quantile (Figure 5.5) semblent confirmer les résultats pour l'autopartage. En revanche, pour le vélopartage et le métro, les graphiques suggèrent une différence entre les deux distributions, de même que pour tous les autres modes.

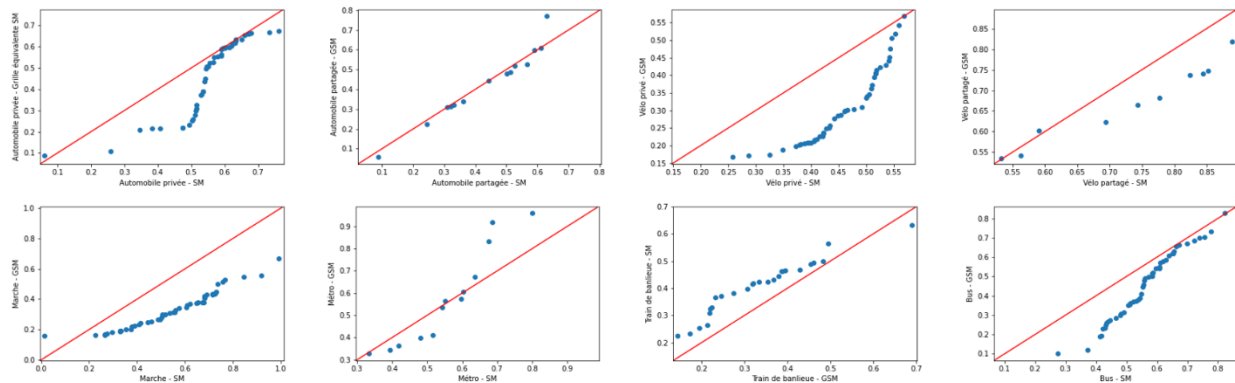


Figure 5.5 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs municipaux et la grille équivalente

Ces observations sont confirmées par les graphiques de densité (Figure 5.6). Ils montrent que les distributions pour l'autopartage se superposent presque entièrement, tandis que des différences sont apparentes pour les autres modes.

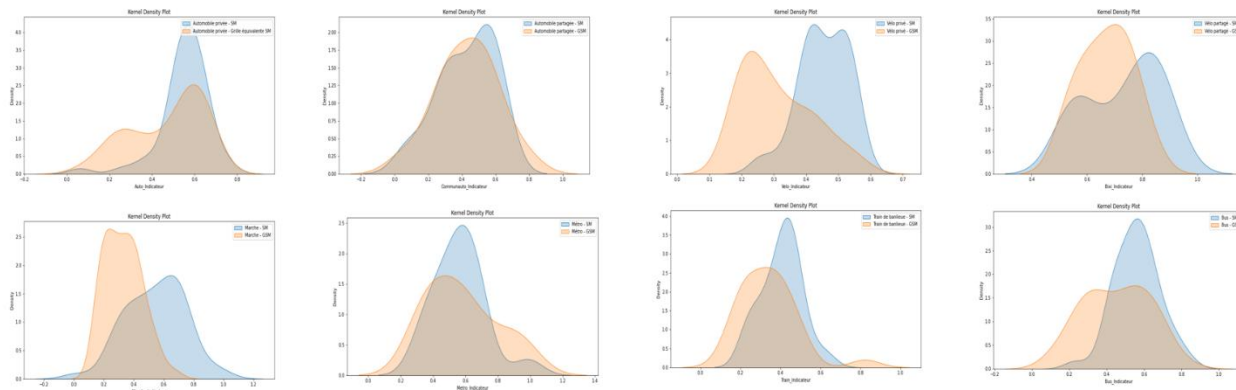


Figure 5.6 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de municipaux et la grille équivalente

L'incohérence entre les tests statistiques et les graphiques s'explique par le nombre réduit de secteurs municipaux, qui est au maximum de 49 et diminue en fonction de la couverture du mode, rendant les tests moins sensibles aux différences. Il semble que l'indicateur de l'autopartage a une distribution similaire pour ces deux systèmes de division, si on se fie aux résultats confirmés par les tests statistiques et les graphes. Les distributions des autres indicateurs diffèrent d'un système de division à l'autre.

Pour conclure sur l'impact de l'agrégation spatiale, celui-ci est particulièrement significatif lors du calcul de ces indicateurs. Il est principalement amplifié par la nature des divisions utilisées, incluant celles du recensement qui sont nombreuses et de petite taille près du centre de l'île de Montréal, ainsi que des grilles telles que celle équivalente aux secteurs municipaux, qui en raison de leur taille, englobent plusieurs divisions partiellement situées en dehors du territoire étudié.

## 5.2 Effet d'échelle

Dans le but d'évaluer l'effet d'échelle du problème d'agrégation spatiale, les distributions des indicateurs pour les différents modes sont comparées pour les paires de divisions suivantes : les aires de diffusion et les secteurs de recensement, les secteurs de recensement et les secteurs municipaux, les grilles équivalentes aux aires de diffusion et secteurs de recensement et les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et secteurs municipaux.

## 5.2.1 Comparaison des distributions des indicateurs pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement

Les tests statistiques, dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5.4, indiquent l'existence de différences significatives entre les distributions pour tous les modes.

Tableau 5.4 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	1	1
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	1	1
Marche	1	1
Métro	1	1
Train	1	1
Bus	1	1

Ces résultats sont confirmés par les graphes quantile-quantile (Figure 5.7), qui montrent une forte déviation des droites par rapport à la ligne de 45 degrés. Cette déviation est plus ou moins importante selon les modes. Pour l'autopartage, la marche, le train de banlieue et le bus, certaines parties de la droite se rapprochent ou se superposent à la droite de 45 degrés. Mais pour l'automobile privée, le vélo privé et le vélopartage la droite s'éloigne significativement.

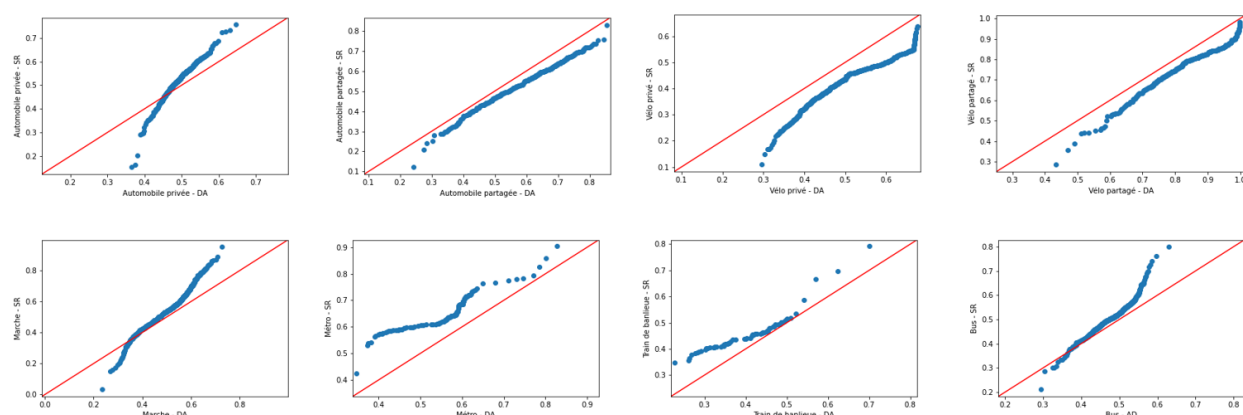


Figure 5.7 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés les aires de diffusion et les secteurs de recensement

De même, les graphes de densité (Figure 5.8) confirment ces résultats qui montrent des superpositions dans les diagrammes de densité, mais aussi des différences apparentes. L'autopartage, le vélopartage ainsi que le bus montrent des formes plus similaires et des superpositions plus importantes que les autres modes, mais restent différentes. Les graphes des autres modes montrent des différences plus importantes.

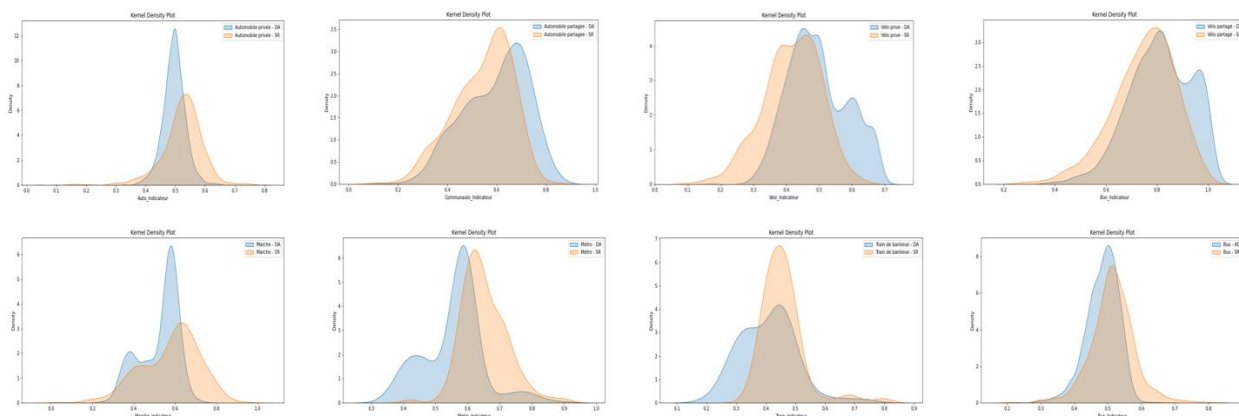


Figure 5.8 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement

Ce ne sont pas les mêmes modes qui montre des ressemblances même minimales pour les différentes distributions en analysant les deux graphes, ce qui permet de conclure le constat initial de différences significatives entre ces distributions pour ces deux divisions.

### 5.2.2 Comparaison des distributions des indicateurs pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux

Tableau 5.5 montre les résultats des tests statistiques Mann-Whitney U et Kolmogorov-Smirnov. Les tests trouvent des différences significatives entre les distributions pour tous les modes sauf le vélopartage et la marche.

Tableau 5.5 Résultats des test statistiques pour les aires de diffusion et les secteurs de recensement

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	1	1
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	0	0
Marche	0	0
Métro	1	1
Train	1	1
Bus	1	1

L'analyse des graphiques quantile-quantile (Figure 5.9) et de densité (Figure 5.10) conduit aux mêmes conclusions. En effet, les distributions du vélopartage et de la marche présentent des formes similaires avec beaucoup de superpositions, ainsi que des lignes dans les graphiques quantile-quantile qui se rapprochent de la droite à 45 degrés pour la majorité des points. En revanche, les autres modes de transport montrent des distributions de formes différentes, avec des lignes dans le graphique quantile-quantile s'éloignant de la droite à 45 degrés.

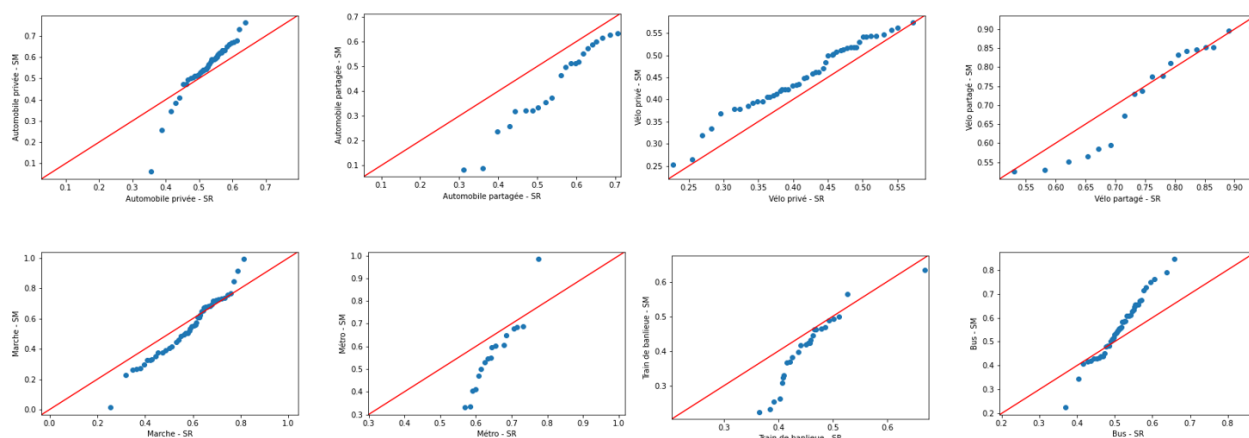


Figure 5.9 Graphes q-q des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux

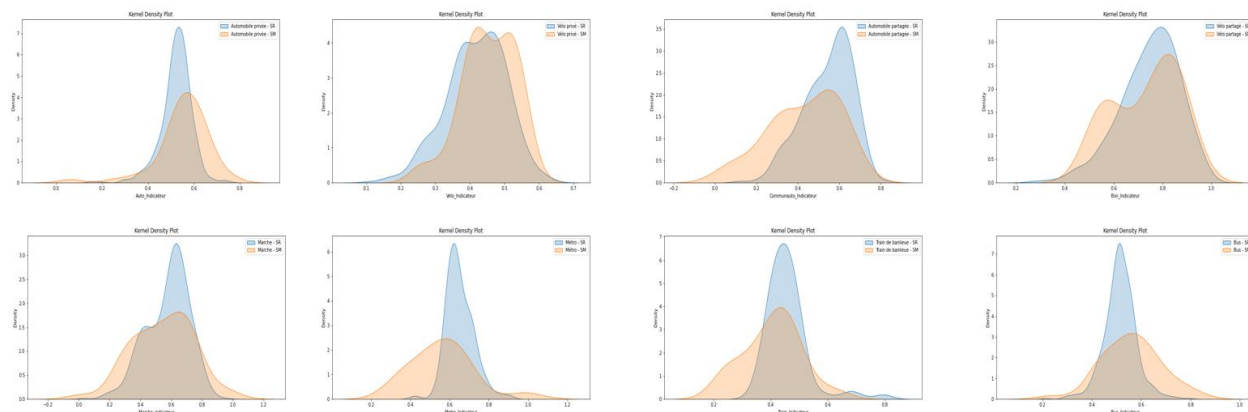


Figure 5.10 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux

La comparaison des distributions pour les secteurs de recensement et les secteurs municipaux montre que bien que les distributions soient différentes, elles sont néanmoins plus proches pour certains modes que les distributions des aires de diffusion et des secteurs de recensement. En comparant les graphes de densité, il est clair que les pics sont plus alignés et que les différences sont moins marquées que pour les secteurs de recensement et les aires de diffusion. De plus, les graphes quantile-quantile montrent que les lignes sont plus proches de la diagonale de 45 degrés pour les secteurs de recensement et municipaux, indiquant une meilleure correspondance des distributions.

L'effet d'échelle est très présent lorsqu'on compare les différentes tailles de divisions géographiques. Cet effet est probablement accentué par la variabilité importante des aires, surtout pour les aires de diffusion. En effet, cet impact est moins prononcé lorsque la variabilité diminue, comme c'est le cas pour les secteurs de recensement et les divisions municipales.

### 5.2.3 Évaluation de la sous-estimation, surestimation et bonne estimation des indicateurs

Une autre façon d'évaluer l'impact de l'effet d'échelle de l'agrégation spatiale est proposé par Jasso Chavez (2023) qui évalue la sous-estimation, surestimation et bonne estimation d'indicateurs d'accessibilité lors de l'utilisation des aires de diffusion et des secteurs de recensement, comparés aux indicateurs d'accessibilité calculé quand les points sont les bâtiments résidentiels au lieu des centroïdes des zones.

Cette méthode est appliquée dans le cadre de cette étude en comparant les valeurs des indicateurs des aires de diffusion et celles des secteurs de recensement et municipaux auxquels elles appartiennent, afin de déterminer si l'indicateur est sous-estimé, surestimé ou bien estimé avec une précision de 0.01 par le calcul pour les secteurs. Le résultat est présenté à la Figure 5.11.

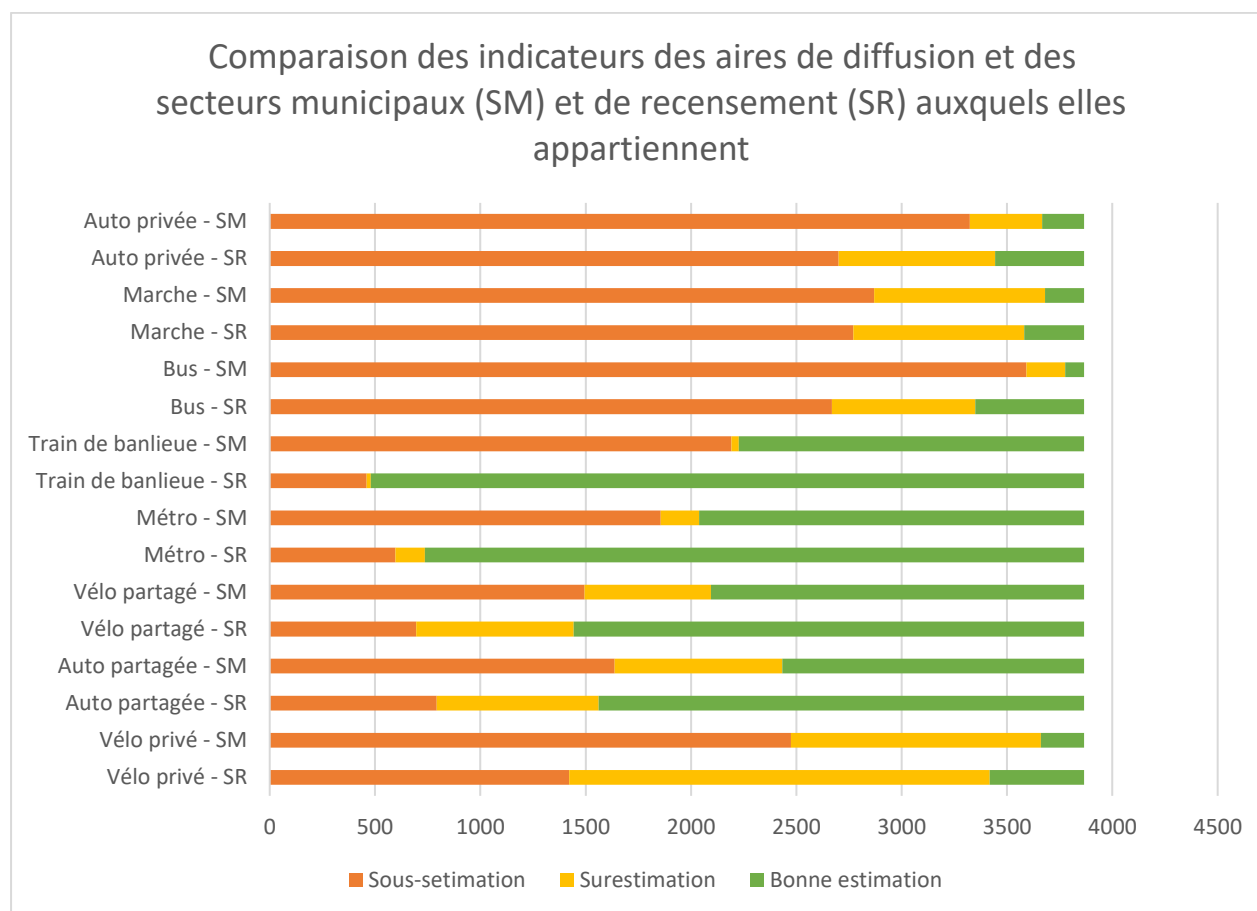


Figure 5.11 Comparaison des indicateurs des aires de diffusion et des secteurs municipaux (SM) et de recensement (SR) auxquels elles appartiennent

Les indicateurs de l'automobile privée, le vélo privé, la marche et le bus, sont pour la majorité sous-estimés par les calculs au niveau des secteurs de recensement, et cela est encore plus notable pour les secteurs municipaux. Ce sont les quatre modes qui sont disponibles sur la grande majorité du territoire étudié.

Les indicateurs de train de banlieue et de métro sont bien estimés pour la majorité des secteurs de recensement. Cela est surtout dû au fait que ces indicateurs ont une valeur nulle pour la majorité des aires de diffusion et des secteurs de recensement. Ils sont plus sous-estimés par les secteurs municipaux qui ont une plus grande superficie et qui vont donc inclure le même nombre de stations

et lignes mais divisés par une aire plus grande. Ce même phénomène est observable pour le vélo et l'autopartage, où les indicateurs sont bien estimés dans la majorité des cas pour les secteurs de recensement et dans environ la moitié des cas pour les secteurs municipaux. La seule différence est qu'il y a plus d'aires de diffusion où ces modes sont offerts comparés au métro et train de banlieue, mais la majorité des bonnes estimations est due aux valeurs nulles pour les aires de diffusion et secteurs où ces modes ne sont pas offerts.

En conclusion, pour la majorité des cas, plus les secteurs sont grands, plus ils vont tendre à sous-estimer les valeurs des indicateurs à cause de l'effet de lissage.

#### **5.2.4 Comparaison des distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement**

Cette partie compare les distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement. Les tests statistiques Mann-Whitney U et Kolmogorov-Smirnov, dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5.6, trouvent que les deux systèmes de grilles résultent en des distributions significativement différentes.

Tableau 5.6 Résultats des test statistiques pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	1	1
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	1	1
Marche	1	1
Métro	1	1
Train	1	1
Bus	1	1

Les graphiques q-q, montrés à la Figure 5.12 , corroborent ces résultats avec des droites qui ne correspondent pas à la droite de 45 degrés. Il est notable que pour l'autopartage, la marche et le vélopartage, ces courbes sont assez proches de la ligne de référence sur une certaine portion.

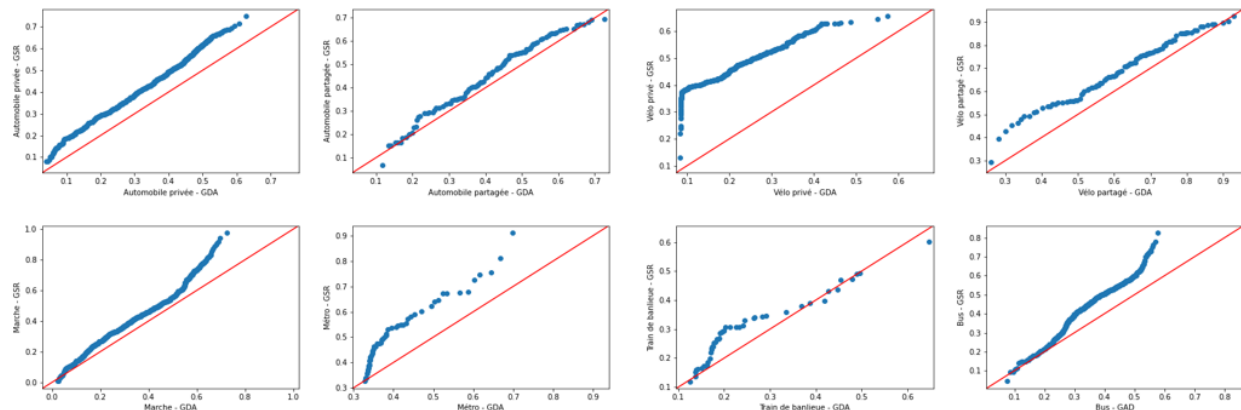


Figure 5.12 Graphes q-q pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement

De même, les graphiques de densité, présentés à la Figure 5.13, montrent des distributions dont les formes sont différentes et ne se superposent pas. Ces différences sont très marquées pour des modes comme le vélo privé ou le bus, et moins prononcées pour l'autopartage et le vélopartage.

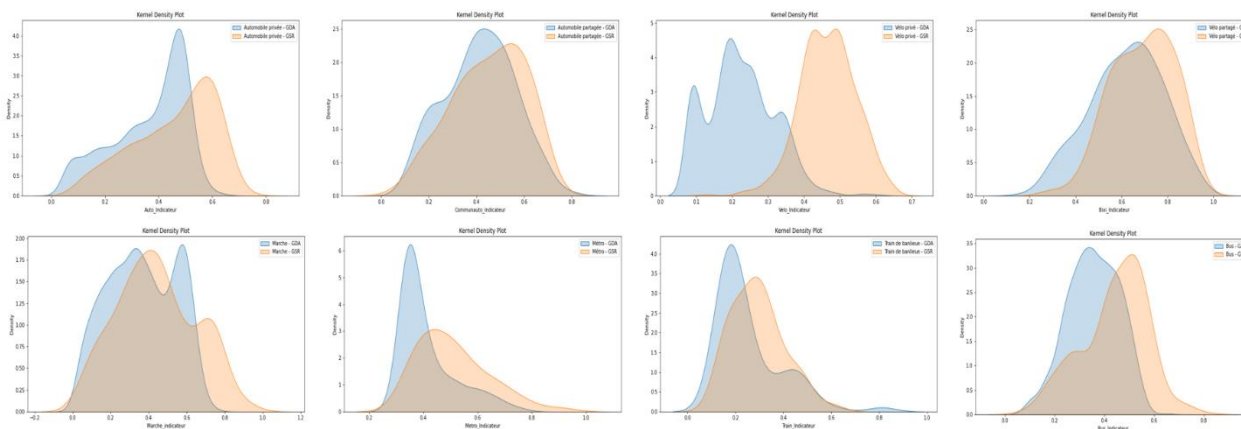


Figure 5.13 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement

En somme, les distributions des indicateurs des différents modes ne sont pas similaires entre les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement, probablement en raison de la spécificité et de la variabilité accrue des indicateurs dans les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion, qui sont de très petite taille.

## 5.2.5 Comparaison des distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux

Cette partie compare les distributions des indicateurs pour les grilles équivalentes secteurs de recensement et aux secteurs municipaux. Pour l'automobile privée, le vélopartage, le métro, le bus et le train, les tests statistiques montrent que les distributions ne sont pas significativement différentes, comme indiqué dans le Tableau 5.7 qui présente les résultats des tests statistiques.

Tableau 5.7 Résultats des test statistiques pour les grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement

Mode	Résultat du test Mann–Whitney U	Résultat du test Kolmogorov–Smirnov
Automobile privée	0	0
Autopartage	1	1
Vélo privé	1	1
Vélopartage	0	0
Marche	1	1
Métro	0	0
Train	0	0
Bus	0	0

Les graphes quantile-quantile, présentés à la Figure 5.14, montrent des distributions assez similaires pour l'automobile privée et partagée, le vélopartage, le bus et le train de banlieue et des distributions assez différentes pour le reste des modes.

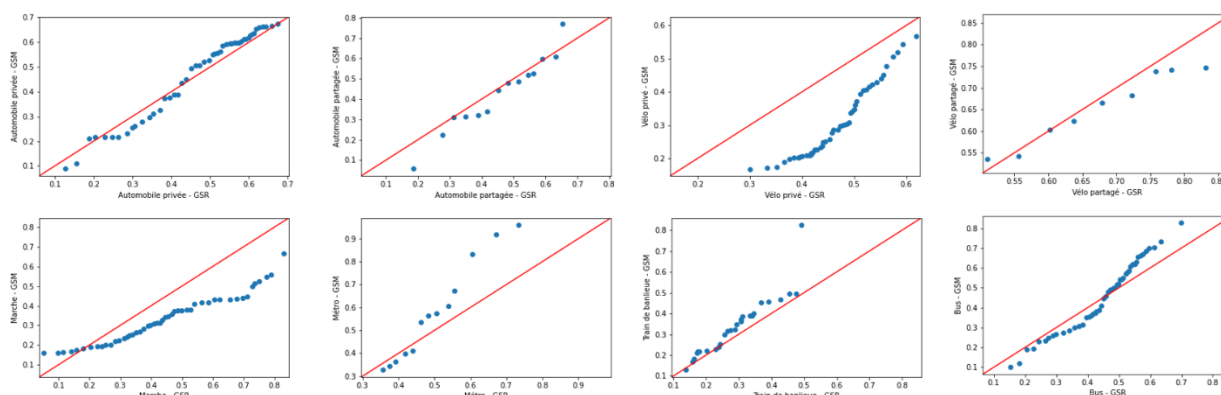


Figure 5.14 Graphes q-q pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux

Les graphes de densité, présentés à la Figure 5.15, montrent des distributions similaires pour l'automobile privée et l'autopartage, confirmant le résultat de similarité des distributions pour l'automobile privée.

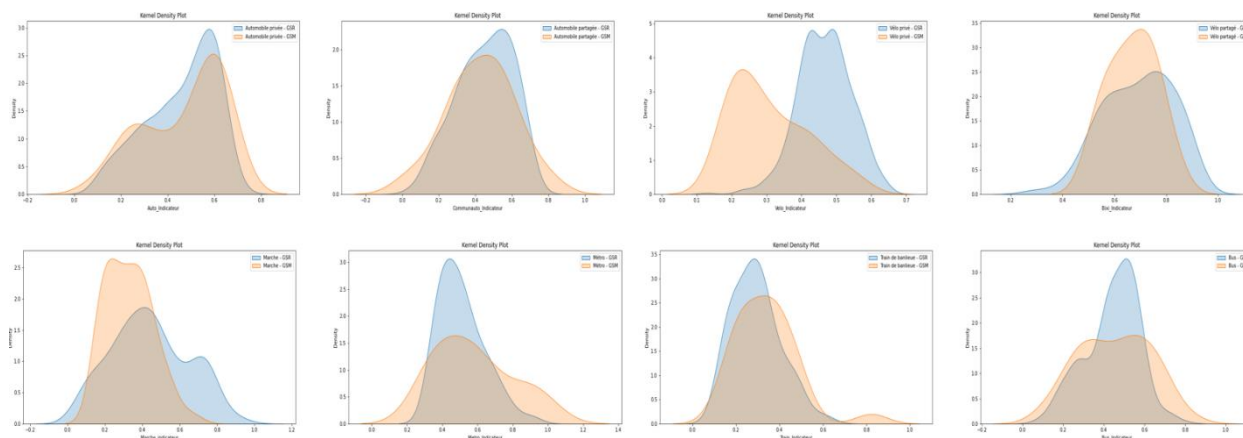


Figure 5.15 Graphes de densité des distributions des indicateurs calculés pour les grilles équivalentes aux secteurs de recensement et aux secteurs municipaux

En se concentrant uniquement sur les résultats simultanément corroborés par les tests et les graphes, il apparaît que seule l'automobile privée présente des distributions similaires pour les deux systèmes de grilles. Il est pourtant notable que les graphes montrent plus de similarités pour tous les modes dans ce cas que lors de la comparaison des grilles équivalentes aux aires de diffusion et aux secteurs de recensement. Ces graphes montrent aussi plus de similarités pour cette comparaison que quand on compare les secteurs municipaux et les secteurs de recensement.

Pour conclure sur l'effet d'échelle du problème d'agrégation spatiale, il est moins prononcé sur les indicateurs des différents modes lorsque les divisions sont de taille importante, comme attendu, en raison de l'effet de lissage.

L'analyse de l'exactitude des estimations n'a pas été effectuée pour les grilles, car elles ne sont pas imbriquées.

## 5.2.6 Conclusion sur le problème d'agrégation spatiale

Cette analyse des différentes divisions permet de mettre l'accent sur les différents effets de l'agrégation spatiale qui sont rendus plus importants par certaines caractéristiques des divisions. Les indicateurs sont le moins sensibles aux changements de divisions quand celles si sont de grande taille et ont des aires moins variables, comme pour les grilles équivalentes aux secteurs de

recensement et municipaux, mais cela ne veut pas dire que ces choix sont les meilleurs pour l'étude des indicateurs. En effet, en utilisant de telles divisions, la spécificité des résultats et des zones est perdue en raison du lissage qui a lieu. De plus, les divisions du recensement et municipales peuvent être plus intéressantes à étudier pour prendre en compte la taille de la population affectée, vu que ces divisions comportent toutes le même nombre de résidents. Ce type de divisions permet de montrer les scores des modes qui affectent un même nombre de personnes. Par exemple un carré dans une zone peu peuplée qui a un mauvais score pour l'autobus n'est pas aussi important d'un point de vue de planification de l'offre de transport qu'une zone plus petite mais densément peuplée qui est mal desservie par l'autobus. De plus, les données socio-démographiques sont disponibles pour ce genre de division, permettant de prendre en compte le type de personnes affectées par une certaine offre, notamment des segments plus vulnérables de la population qui ont des besoins différents en termes de mobilité. Un bon compromis pourrait être l'utilisation des secteurs de recensement qui ne lissent pas trop les résultats mais qui ne sont pas petits au point de changer drastiquement de valeurs si les limites des zones sont modifiées. Mais ce choix dépend énormément du but de l'analyse. Principalement et selon le choix fait, il est important de noter lors de l'utilisation de ces divisions que plus elles sont petites et variables, plus les valeurs numériques trouvées pourraient changer en modifiant les limites et tailles des divisions.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION

### 6.1 Sommaire du contenu et des contributions

Ce mémoire est composé de cinq chapitres. Dans le premier chapitre, l'introduction, la notion de multimodalité en générale et de multimodalité de l'offre en particulier est définie comme étant l'existence de plusieurs options de modes. Ensuite, l'importance de la multimodalité pour les individus, l'environnement et le système de transport est montrée. Et en se basant sur son importance, la nécessité d'un indicateur de multimodalité afin de mesurer cet aspect de la mobilité est justifiée. Enfin les objectifs de ce projet sont énoncés, avec l'objectif principal étant la formulation d'un indicateur composite qui permet de mesurer la multimodalité de l'offre de transport dans le contexte montréalais. Le contexte spatio-temporel de cette étude porte sur les villes de Montréal et Laval pour la période d'automne 2018, s'étendant de septembre à décembre.

Le second chapitre fait l'état des connaissances sur tous les indicateurs de mesures de la multimodalité qui ont été trouvés dans la littérature. Cela permet d'identifier le manque d'indicateurs quantitatifs de multimodalité de l'offre, qui sont comparables pour tous les modes, et qui prennent en compte la qualité de service des modes et les modes partagés.

Le troisième chapitre explique tous les éléments méthodologiques pris en compte dans ce projet. D'abord toutes les bases de données utilisées pour tous les modes sont présentées. Ensuite les formules de mesure de l'offre sont expliquées. Pour chacun des modes étudiés (l'automobile privée, l'autopartage, le vélo privé, le vélopartage, la marche, le métro, l'autobus et le train de banlieue), un indicateur qui mesure l'offre de transport est établi. Pour mesurer l'offre de chaque mode, trois éléments sont pris en compte : la disponibilité, l'accessibilité et la qualité de service. Ensuite ces indicateurs sont normalisés, pour qu'ils soient tous entre 0 et 1, et sont combinés en calculant la moyenne des trois indicateurs pour chaque mode. La partie suivante présente les différentes divisions du territoire utilisées afin d'étudier l'effet de l'agrégation spatiale sur les indicateurs. Les systèmes de divisions considérés sont les aires de diffusion, les secteurs de recensement, les secteurs municipaux et trois grilles qui ont le même nombre de zones que chacun des systèmes de divisions. Enfin la méthode d'évaluation de la multimodalité est expliquée. Elle consiste en une segmentation des zones en se basant sur les huit indicateurs établis, afin de regrouper les zones ayant des offres de transport similaires, et la comparaison des valeurs médianes de chaque indicateur pour déterminer la multimodalité relative de ces zones.

Le quatrième chapitre montre les résultats et est divisé en deux parties. La première partie évalue les distributions des indicateurs par système de division et permet, pour chacun des modes, de comparer la distribution des indicateurs pour les différents systèmes de division. La deuxième partie analyse la multimodalité des zones. Un algorithme agglomératif hiérarchique est utilisé sur la base de données résultant de l'analyse en composantes principales. Les groupes de zones obtenus sont ensuite analysés et classés du plus au moins multimodal.

L'analyse de la multimodalité des zones à travers diverses divisions révèle plusieurs similarités. Les types de zones identifiés et leur classement restent cohérents. Toutes les divisions permettent de distinguer les catégories suivantes, des plus multimodales aux moins multimodales : les zones centrales desservies par le métro, qui présentent des niveaux très élevés pour la majorité des modes de transport, et les zones centrales mal ou non desservies par le métro, mais avec des niveaux élevés pour plusieurs modes. Viennent ensuite les zones périphériques desservies par le train de banlieue, suivies des zones à l'est de Montréal et au centre de Laval, avec des niveaux bas ou moyens pour la plupart des modes. Enfin, les zones aux extrémités des îles obtiennent des scores bas pour presque tous les modes de transport. Des zones plus spécifiques émergent selon le nombre de groupes, mais les tendances générales restent similaires. Il est également notable que plus les divisions sont fines, moins les types de zones définis sont homogènes spatialement, ce qui est attendu en raison du niveau de détail accru.

Pour les secteurs de recensement, une base de données contenant des données socio-démographiques a été utilisée dans le but de trouver des tendances descriptives des zones selon leur multimodalité. Les résultats de l'analyse montrent des tendances concernant les zones plus et moins multimodales. Globalement les zones moins multimodales se caractérisent par une faible densité de population, un nombre réduit de vieux logements, et des ménages de taille moyenne supérieure aux autres zones. Les habitants de ces zones ont tendance à travailler en dehors de leur secteur de recensement. Et les zones les plus multimodales sont plus densément peuplées, avec des ménages plus petits, la part du territoire urbanisée plus grande et un plus grand nombre de vieux logements. Ces résultats sont cohérents avec les attentes, démontrant que cette méthode mesure bien une réalité.

Le cinquième chapitre étudie la sensibilité des données selon le niveau d'agrégation spatiale en comparant les distributions des différents indicateurs pour les systèmes de divisions considérés, en

utilisant des tests statistiques ainsi que des méthodes graphiques. La comparaison des distributions des différents indicateurs pour les divisions considérées met en évidence les divers effets du niveau d'agrégation spatiale. Les indicateurs sont moins sensibles aux changements de divisions lorsque celles-ci sont de grande taille et ont des aires moins variables. Cependant, ces grandes divisions peuvent lisser les résultats, réduisant ainsi la spécificité des observations. Les divisions de recensement et municipales, bien que présentant une variation de taille importante, offrent une perspective plus centrée sur le nombre d'individus affectés que leur grilles équivalentes, permettant de montrer des scores de modes de transport impactant des populations de tailles similaires. De plus, l'utilisation de ce type de division permet d'avoir des informations sur la population qui sont importantes pour la prise de décisions, comme la présence d'un segment vulnérable de la population par exemple.

Malgré ces différences, le classement des zones selon leur multimodalité produit des résultats similaires pour toutes les divisions, montrant quand même une certaine stabilité dans la caractérisation de la multimodalité quand les scores sont comparés entre eux pour différents découpages.

Les contributions principales de ces mémoires sont : une méthodologie qui permet de mesurer la multimodalité comparative de groupes de zones dans le contexte montréalais qui prend en compte l'expérience des usagers, un portrait de la multimodalité de l'offre des villes de Montréal et Laval pour la période étudiée et une étude de l'impact du choix de divisions sur les résultats du calcul de cet indicateur.

## **6.2 Limitations**

Dans cette partie les limites associés à la méthodologie et aux choix réalisés sont présentées. D'abord il existe des limites par rapport aux bases de données utilisées qui n'étaient pas toutes pour la période d'étude ciblée. La base de données relative au temps de parcours des taxis utilisée pour les calculs de qualité du réseau routier ainsi que la géobase décrivant le réseau routier datent de 2019. Les données concernant les pistes cyclables datent de 2020 et celles du réseau piétonnier datent de 2023 pour Montréal et de 2021 pour Laval. De plus, la base de données relative aux incidents de métro date de 2019. Enfin les données de ponctualité relatives aux autobus de la STM datent de 2023.

Les grilles utilisées pour le calcul des indicateurs ont le même nombre de zones que les autres systèmes de divisions mais le choix de leur positionnement et leur orientation présente une limite, surtout pour la grille équivalente au secteur municipaux qui, en raison de sa taille et du nombre de divisions, inclut des zones hors des villes de Montréal et Laval.

Ensuite pour le calcul de disponibilité des automobiles privées, la largeur des routes ainsi que le type de route n'est pas prise en compte, c'est seulement la longueur linéaire qui est considérée. C'est la même chose pour la marche. Pour les modes partagés, le choix de considérer cinq véhicules comme étant suffisant a été fait en se basant sur une étude réalisée sur le vélopartage à New York mais des études pour chacun de ces modes à Montréal ou dans un contexte similaire aurait donné des limites de nombre de véhicule plus précises et qui reflètent mieux la réalité des usagers. Et dans le but d'alléger les calculs, la disponibilité est calculée au début de chaque heure ce qui réduit la précision des résultats. De plus, pour le service d'autopartage en station, la capacité maximale de la station a été approximée par le plus grand nombre de voitures réservées simultanément.

Pour le calcul de l'accessibilité, la distance à vol d'oiseau est considérée, ce qui ne reflète pas nécessairement la réalité de l'accès et pour les objets qui ne sont pas des points (comme les pistes cyclable ou piétonnes, les routes) les distance sont calculées au centroïde de piste ou route le plus proche, ce qui pourrait potentiellement surestimer la distance à parcourir.

Pour les calculs de qualité de service pour l'automobile, les données de temps de parcours ne sont pas disponibles sur tout le territoire et elles doivent parfois être approximées à partir des zones adjacentes. Aussi la pointe matinale a été sélectionnée pour les calculs, ce qui affecte les résultats qui serait peut-être différents si une autre période de la journée était sélectionnée. Pour le vélo, les bases de données des pistes cyclables de la ville et celles provenant d'OpenStreetMap n'étaient pas exactement superposées et la qualité des pistes a été approximée en utilisant des zones tampons ce qui a potentiellement réduit la précision de l'information. Et les scores numériques assignés à chaque niveau de confort sont arbitraires. Pour les transports en commun, la période de pointe matinale est utilisée pour calculer l'intervalle moyen, mais d'autres moments de la journée auraient pu être choisis. Il a été approximé que l'intervalle maximal était de 60 minutes quand le bus ne passait qu'une fois dans la période étudiée ou ne passait pas du tout. Le choix de définition de l'avance et du retard est basé sur les critères considérés par la STM mais il existe beaucoup de définitions de la ponctualité des transports en commun.

### 6.3 Perspectives de recherche

Les perspectives de recherche peuvent être divisées en deux parties : le développement de l'indicateur et l'application de l'indicateur à d'autres territoires.

Les prochaines étapes dans le développement de cet indicateur pourraient inclure de considérer les zones en tant qu'origine et destination dans un déplacement et non pas l'offre de chaque zone seule. Il serait aussi intéressant de considérer le classement des zones selon la multimodalité de l'offre et de le comparer aux zones classées selon la multimodalité de la demande, dans le but de trouver des zones où ces deux éléments ne correspondent pas l'un à l'autre. De plus, une étude plus approfondie des facteurs socio-démographiques pourrait aider à diriger l'attention des planificateurs vers les zones qui ont une offre qui est peu multimodale mais où les individus y résidant ont un « potentiel » de multimodalité.

Bien que cette étude ait été réalisée pour la région montréalaise, la méthode d'évaluation de la multimodalité des zones pourrait être appliquée à d'autres territoires qui ont une offre de transport similaire. Le défi principal serait l'existence des mêmes bases de données.

## RÉFÉRENCES

- Adresses Québec. (2019). Réseau routier. Retrieved from <https://mrnf.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/adresses-quebec-reseau-routier/>
- Alexandros Voukenas. (2021, August 23, 2021). CALCULATING LAND USE MIX WITH GIS. Retrieved from <https://www.geographyrealm.com/calculating-land-use-mix-with-gis/>
- Amoaning-Yankson, S., & Amekudzi-Kennedy, A. (2017). Transportation System Resilience: Opportunities to Expand from Principally Technical to Sociotechnical Approaches. *2604*(1), 28-36. doi:10.3141/2604-04
- An, Z., Heinen, E., & Watling, D. (2021). When you are born matters: An age-period-cohort analysis of multimodality. *Travel Behaviour and Society*, 22, 129-145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tbs.2020.09.002>
- An, Z., Heinen, E., & Watling, D. (2023). The level and determinants of multimodal travel behavior: Does trip purpose make a difference? *International Journal of Sustainable Transportation*, 17(2), 103-117. doi:10.1080/15568318.2021.1985195
- Ashqar, H. I., Elhenawy, M., Rakha, H. A., & House, L. (2022). Quality of Service Measure for Bike Sharing Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 15841-15849. doi:10.1109/TITS.2022.3145669
- BIXI. (2018). Données ouvertes. Retrieved from <https://bixi.com/fr/donnees-ouvertes/>
- BIXI. (2023). À propos. Retrieved from <https://bixi.com/fr/qui-sommes-nous/>
- Buehler, R., & Hamre, A. (2015). The multimodal majority? Driving, walking, cycling, and public transportation use among American adults. *Transportation*, 42(6), 1081-1101. doi:10.1007/s11116-014-9556-z
- Buzzelli, M. (2020). Modifiable Areal Unit Problem.
- Caggiani, L., & Camporeale, R. (2021, 7-10 Sept. 2021). *Accessibility indicators for fair bike-sharing systems based on level of service*. Paper presented at the 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe).
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, 61(6), 1-36.
- CHASS Data Center. (2016). The Canadian Socio-Economic Information Management System (CANSIM). Retrieved from <https://datacentre.chass.utoronto.ca/chasscansim/>
- Cities Health and Active Transportation Research lab. (2022). OSM Can-BICS. Retrieved from <https://storymaps.arcgis.com/stories/4ed0f50cbb6b45baa1f3d58f9d0c6507>
- Communauto Québec. (2024). Fonctionnement. Retrieved from <https://quebec.communauto.com/fonctionnement/>
- Data Viz Catalogue. (2024). Density Plot.

- de Amorim, L. B. V., Cavalcanti, G. D. C., & Cruz, R. M. O. (2023). The choice of scaling technique matters for classification performance. *Applied Soft Computing*, 133, 109924. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109924>
- Derrible, S., & Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 3678-3691. doi:10.1016/j.physa.2010.04.008
- Deschaintres, E., Morency, C., & Trepanier, M. (2021). Measuring changes in multimodal travel behavior resulting from transport supply improvement. In (Vol. 2675, pp. 533-546): SAGE Publications Ltd.
- Diab, E., Badami, M., & El-Geneidy, A. (2015). Bus Transit Service Reliability and Improvement Strategies: Integrating the Perspectives of Passengers and Transit Agencies in North America. *Transport Reviews*, 35, 292-328. doi:10.1080/01441647.2015.1005034
- Diana, M., & Pirra, M. (2016). A comparative assessment of synthetic indices to measure multimodality behaviours. *Transportmetrica A Transport Science*, 12(9), 771-793. doi:<https://doi.org/10.1080/23249935.2016.1177133>
- DMTI Spatial Inc. (2021). Road Junction Point. Retrieved from <https://geoapp.bibl.ulaval.ca/>
- Doras J. L. (1979). Irrégularité des autobus et temps d'attente des voyageurs. *TEC* 33, 13-21.
- exo. (2021). État du service Retrieved from <https://exo.quebec/fr/etat-services/train/ligne-deux-montagnes>
- Federal Highway Administration. (2017). *Typecasting Neighborhoods and Travelers: Analyzing the Geography of Travel Behavior Among Teens and Young Adults in the U.S.* Retrieved from Washington, D.C.: [https://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/gvtreport\\_01302017\\_508\\_final.pdf](https://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/gvtreport_01302017_508_final.pdf)
- Ferster Colin, N. T., Manaugh Kevin, Beirsto Jeneva, Laberee Karen, Winters Meghan. (2022). OSM Can-BICS. Retrieved from <https://zenodo.org/records/7444398>
- Frank, L. D., Sallis, J. F., Saelens, B. E., Leary, L., Cain, K., Conway, T. L., & Hess, P. M. (2010). The development of a walkability index: application to the Neighborhood Quality of Life Study. *British Journal of Sports Medicine*, 44(13), 924. doi:10.1136/bjsm.2009.058701
- Fricker, C., & Gast, N. (2016). Incentives and redistribution in homogeneous bike-sharing systems with stations of finite capacity. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 5(3), 261-291. doi:<https://doi.org/10.1007/s13676-014-0053-5>
- Friman, M., Lättman, K., & Olsson, L. (2020). Public Transport Quality, Safety, and Perceived Accessibility. *Sustainability*, 12, 3563. doi:10.3390/su12093563
- Fu, X., van Lierop, D., & Ettema, D. (2023). Multigroup Multimodality Index: A Method to Solve the Issue of Transport Mode Classification in Measuring Multimodality. *Findings*. doi:10.32866/001c.72072
- Groth, S., & Kuhnimhof, T. (2021). Multimodality in Transportation. In R. Vickerman (Ed.), *International Encyclopedia of Transportation* (pp. 118-126). Oxford: Elsevier.
- Guthrie, W. F. (2020). *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (NIST Handbook 151)*. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.18434/M32189>

- Haas, R., Felio, G., Lounis, Z., & Cowe Falls, L. (2009). Measurable performance indicators for roads: Canadian and international practice.
- Heinen, E. (2018). Are multimodals more likely to change their travel behaviour? A cross-sectional analysis to explore the theoretical link between multimodality and the intention to change mode choice. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 56, 200-214. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.04.010>
- Heinen, E., & Chatterjee, K. (2015). The same mode again? An exploration of mode choice variability in Great Britain using the National Travel Survey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 266-282. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.015>
- Jasso Chavez, J. A. (2023). *Accessibility in Montreal: Examining the Modifiable Spatio-Temporal Unit Problem (MSTUP) in Supermarket Accessibility*. (Master's Thesis), McGill University, Montreal. Retrieved from <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/x920g3411>
- Kabra, A., Belavina, E., & Girotra, K. (2019). Bike-Share Systems: Accessibility and Availability. *Management Science*, 66. doi:10.1287/mnsc.2019.3407
- Kaveh Rezvani Dehaghani, C. M. (2023). *A New Failure Strategy to Enhance the Vulnerability Assessment of Urban Metro Networks*. Transportation Research Procedia.
- Khedri, B., Malarkey, D., & MacKenzie, D. (2022). Emerging Practices in Multimodal Design and Performance Measurement: Review of Recent Literature and Practical Documents. *Transportation Research Record*, 2676(7), 672-684. doi:10.1177/03611981221082545
- Kingsbury, K. T., Lowry, M. B., & Dixon, M. P. (2011). What Makes a “Complete Street” Complete?: A Robust Definition, Given Context and Public Input. *Transportation Research Record*, 2245(1), 103-110. doi:10.3141/2245-13
- Klinger, T. (2017). Moving from monomodality to multimodality? Changes in mode choice of new residents. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 104, 221-237. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.008>
- La Société de transport de Montréal. (2023, 2022). Incidents du réseau du métro. Retrieved from <https://donnees.montreal.ca/dataset/incidents-du-reseau-du-metro>
- Lee, C., & Miller, J. S. (2017). A probability-based indicator for measuring the degree of multimodality in transportation investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 103, 377-390. doi:10.1016/j.tra.2017.06.003
- Lefebvre-Ropars, G.-L. (2017). *Analyse de la contribution des indicateurs de marchabilité à la modélisation de la demande piétonne*. École Polytechnique de Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/2714/> (masters)
- Lemonde, C., Arsenio, E., & Henriques, R. (2021a). Integrative analysis of multimodal traffic data: addressing open challenges using big data analytics in the city of Lisbon. *European Transport Research Review*, 13(1), 64. doi:10.1186/s12544-021-00520-3
- Lemonde, C., Arsenio, E., & Henriques, R. (2021b). Public Transportation Multimodality in the City of Lisbon. *Transportation Research Procedia*, 58, 75-82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.011>

- Lepage, S. (2019). *Modélisation des interactions entre les modes de transport aux abords des stations de métro*. Polytechnique Montréal, Retrieved from <https://publications.polymtl.ca/4074/>
- Litman, T. (2001). You Can Get There From Here: Evaluating Transportation Choice. *Transportation Research Record*, 1756(Summer), 32-41.
- Lomax, T., & Schrank, D. (2002). USING TRAVEL TIME MEASURES TO ESTIMATE MOBILITY AND RELIABILITY IN URBAN AREAS.
- Mehdizadeh, M., Zavareh, M. F., & Nordfjaern, T. (2019). Mono- and multimodal green transport use on university trips during winter and summer: Hybrid choice models on the norm-activation theory. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 130, 317-332. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.046>
- Ministère de l'Emploi et de la Solidarité Sociale. (2016, 31 December 2023). LOI SUR LE RÉSEAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN.
- Mobility Data. (2024). GTFS Realtime Overview¶. Retrieved from <https://gtfs.org/realtime/>
- Montréal, C. m. d. (2018). Données géoréférencées. Retrieved from [https://observatoire.cmm.qc.ca/produits/donnees-georeferencees/#utilisation\\_du\\_sol](https://observatoire.cmm.qc.ca/produits/donnees-georeferencees/#utilisation_du_sol)
- Montréal, V. d. (2023). Trottoir et îlot (Base de données des actifs de voirie). Retrieved from <https://donnees.montreal.ca/dataset/voirie-trottoir-ilot>
- Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward's Criterion? *Journal of Classification*, 31(3), 274-295. doi:10.1007/s00357-014-9161-z
- Nix, S. (2021). Quantifying the impacts of the modifiable areal unit problem in travel demand models. doi:10.32920/ryerson.14649405.v1
- Nobis, C. (2007). Multimodality: Facets and Causes of Sustainable Mobility Behavior. 2010(1), 35-44. doi:10.3141/2010-05
- O'Mahony, E., & Shmoys, D. B. (2015). *Data Analysis and Optimization for (Citi)Bike Sharing*. Paper presented at the AAAI Conference on Artificial Intelligence.
- Rahimi-Golkhandan, A., Garvin, M. J., & Brown, B. L. (2019). Characterizing and measuring transportation infrastructure diversity through linkages with ecological stability theory. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 128, 114-130. doi:10.1016/j.tra.2019.07.013
- Ren, Z., Fusco, G., Lownes, N., & Zhu, J. (2022). Entropy-Based Diversity Quantification of Multimodal Transportation Systems: Physical Infrastructure Perspective versus Travel Behavior Perspective. *Journal of Urban Planning and Development*, 148(3). doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000855
- Rojas Thomas, J. C., Santos Peñas, M., & Mora, M. (2013). *New Version of Davies-Bouldin Index for Clustering Validation Based on Cylindrical Distance*.
- Roth, N. E. (2016). *Geographic Data Clustering For Neighborhood Type Definition, Comparison, and Travel Behavior Prediction*. (Ph.D.), University of California, Davis, United States --

- California. Retrieved from <https://www.proquest.com/dissertations-theses/geographic-data-clustering-neighborhood-type/docview/1905777547/se-2?accountid=40695>
- [https://polymtl.on.worldcat.org/atoztitles/link?sid=ProQ:&issn=&volume=&issue=&title=Geographic+Data+Clustering+For+Neighborhood+Type+Definition%2C+Comparison%2C+and+Travel+Behavior+Prediction&spage=&date=2016-01-01&atitle=Geographic+Data+Clustering+For+Neighborhood+Type+Definition%2C+Comparison%2C+and+Travel+Behavior+Prediction&au=Roth%2C+Nathaniel+Edward&id=doi:ProQuestDissertations&thesesGlobalDatabase.\(10188075\)](https://polymtl.on.worldcat.org/atoztitles/link?sid=ProQ:&issn=&volume=&issue=&title=Geographic+Data+Clustering+For+Neighborhood+Type+Definition%2C+Comparison%2C+and+Travel+Behavior+Prediction&spage=&date=2016-01-01&atitle=Geographic+Data+Clustering+For+Neighborhood+Type+Definition%2C+Comparison%2C+and+Travel+Behavior+Prediction&au=Roth%2C+Nathaniel+Edward&id=doi:ProQuestDissertations&thesesGlobalDatabase.(10188075))
- Shahapure, K. R., & Nicholas, C. (2020, 6-9 Oct. 2020). *Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score*. Paper presented at the 2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA).
- Sheskin, D. J. (2003). *Handbook of parametric and nonparametric statistical procedures* (3 ed.). Philadelphia, PA: Chapman & Hall/CRC.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of Diversity. *Nature*, 163(4148), 688-688. doi:10.1038/163688a0
- Smart Growth, A. (2024). Complete Streets policies - Smart Growth America. *National Complete Streets Coalition*.
- Susilo, Y. O., & Axhausen, K. W. (2014). Repetitions in individual daily activity–travel–location patterns: a study using the Herfindahl–Hirschman Index. *Transportation*, 41(5), 995-1011. doi:10.1007/s11116-014-9519-4
- Transit Feeds. (2019a). GTFS - 16 October 2019. Retrieved from <https://transitfeeds.com/p/societe-de-transport-de-montreal/39/20191016>
- Transit Feeds. (2019b). GTFS - 29 July 2019. Retrieved from <https://transitfeeds.com/p/agence-metropolitaine-de-transport/1174/20190729>
- Transportation Research Board National Academies of Sciences, E., Medicine,. (2013). Transit Capacity and Quality of Service Manual, Third Edition. In I. K. Associates, amp, P. Brinckerhoff, I. K. F. H. Group, T. A. Institute, amp, & M. Transportation (Eds.), (pp. 685). Washington, DC: The National Academies Press.
- Tsirimpa, A., Polydoropoulou, A., Pagoni, I., & Tsouros, I. (2019). A reward-based instrument for promoting multimodality. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 121-140. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.07.002>
- Ville de Laval. (2020). Pistes cyclables et piétonnières, [Jeu de données]. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20210301033836/https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/pistes-cyclables-et-pietonniere>
- Ville de Laval. (2021). Surface de rue et transport actif. Retrieved from <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/surface-de-rue-et-transport-actif>
- Ville de Laval. (2023). Pistes cyclables et piétonnières, [Jeu de données]. Retrieved from <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/pistes-cyclables-et-pietonniere>
- Ville de Montréal. (2020). Réseau cyclable. Retrieved from <https://web.archive.org/web/20200806095136/https://donnees.montreal.ca/ville-de-montreal/pistes-cyclables>

- Ville de Montréal. (2024). Réseau cyclable. Retrieved from <https://donnees.montreal.ca/dataset/pistes-cyclables>
- Winters, M., Zanotto, M., & Butler, G. (2020). Système de classification du confort et de la sécurité des voies cyclables canadiennes (Can-BICS) : convention d'appellation commune des aménagements cyclables. *Promotion de la santé et prévention des maladies chroniques au Canada*, 40, 319-324. doi:10.24095/hpcdp.40.9.04f
- Xie, F., & Levinson, D. (2009). Topological evolution of surface transportation networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(3), 211-223. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.09.009>
- Zhang, M., & Kukadia, N. (2005). Metrics of Urban Form and the Modifiable Areal Unit Problem. *Transportation Research Record*, 1902, 71-79. doi:10.3141/1902-09

## ANNEXE A BLOCS DE STATIONS DU MÉTRO

Tableau A.6.1 Blocs de stations de métros

Numéro du bloc	Stations incluses
1	1,2
2	2,3,4,5
3	5,6,7
4	7,8,9,10,11
5	11,12,13,14
6	14,15,16,17,18
7	18,19,20,21,22,23
8	23,24
9	24,25,26
10	26,27,28
11	28,29,30,31
12	7,32,33,34,35,36,37
13	37,38
14	38,24
15	24,39,40,41
16	42,43,44,45,46,47,48,11
17	11,49
18	49,50,51,52
19	52,53,54,18
20	18,55,56,57
21	57,58,59,60
22	60,61
23	61,62,63,64,65,66
24	18,67,68

La numérotation des stations est montrée dans la figure ci-dessous.

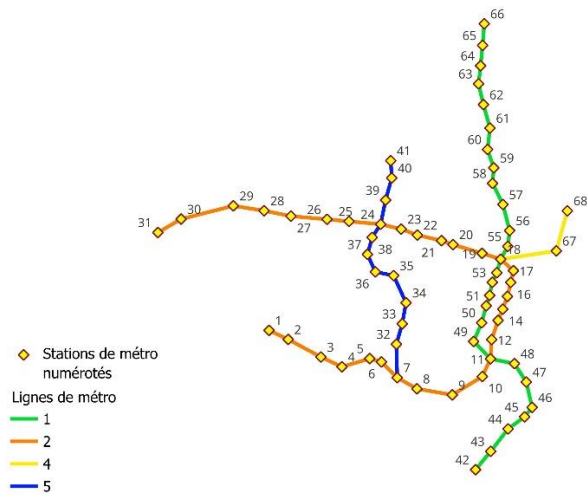


Figure Annexe A.6.1 Carte du réseau du métro montrant la numérotation des stations

## ANNEXE B CARTES DES INDICATEURS

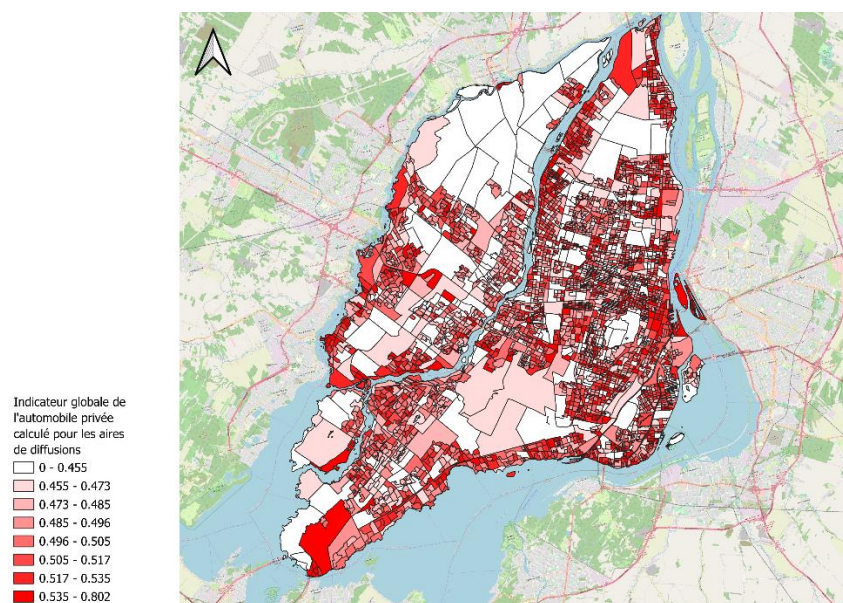


Figure B.1 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les aires de diffusion

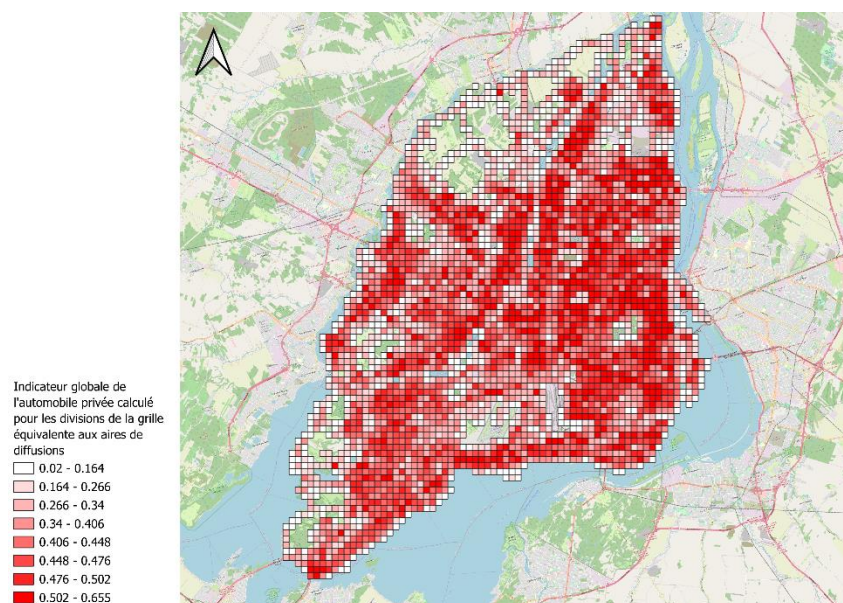


Figure B.2 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

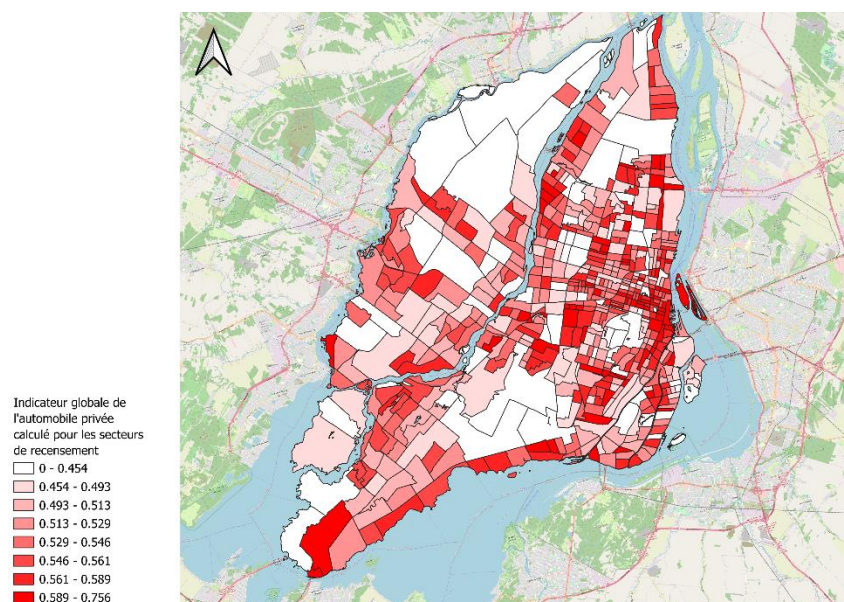


Figure B.3 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les secteurs de recensement

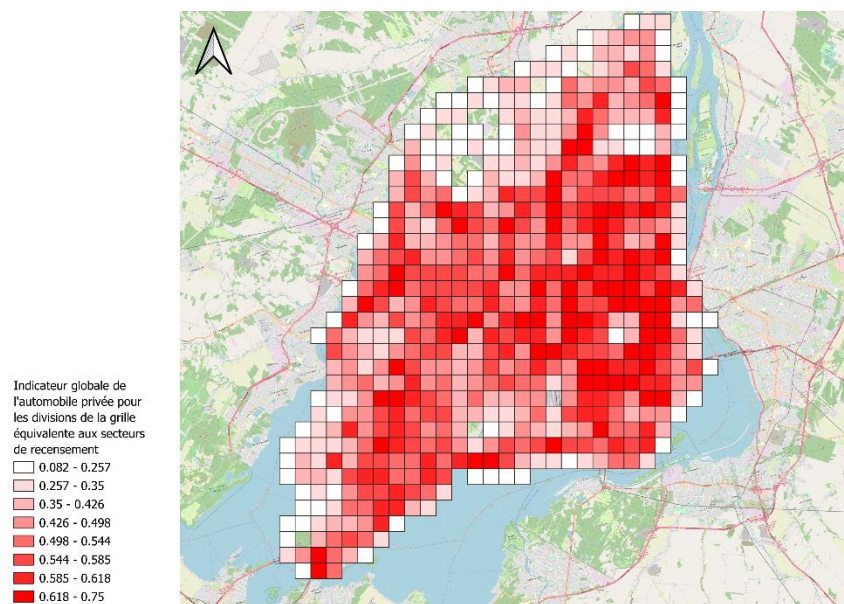


Figure B.4 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

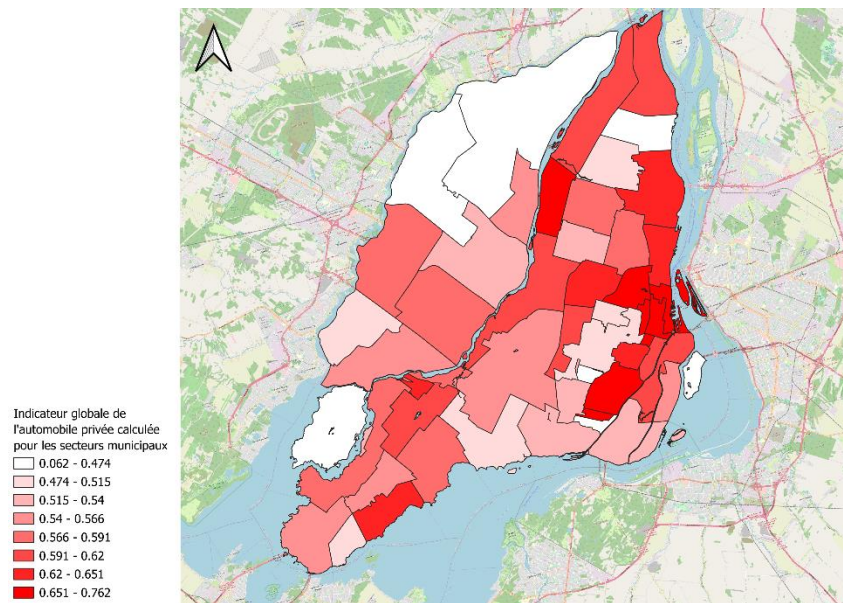


Figure B.5 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les secteurs municipaux

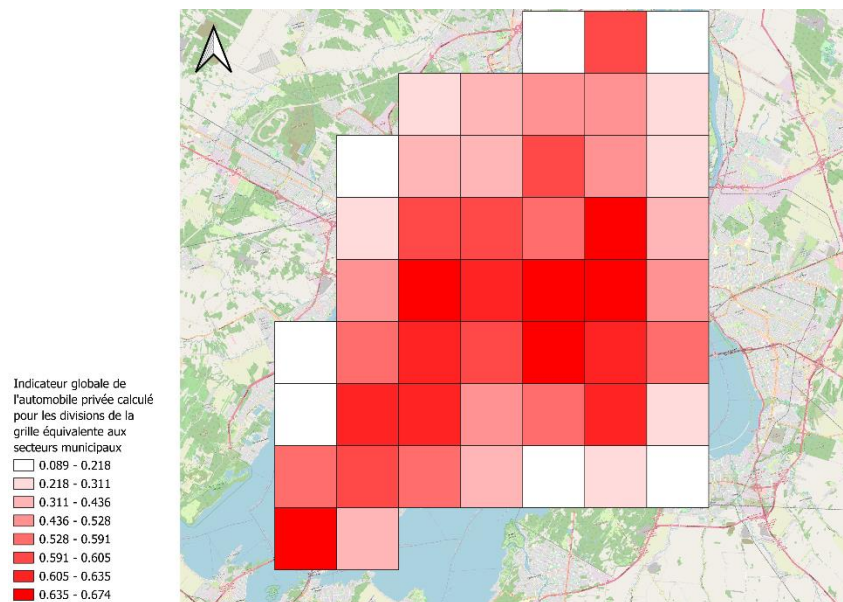


Figure B.6 Distribution de l'indicateur global pour l'automobile privée pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

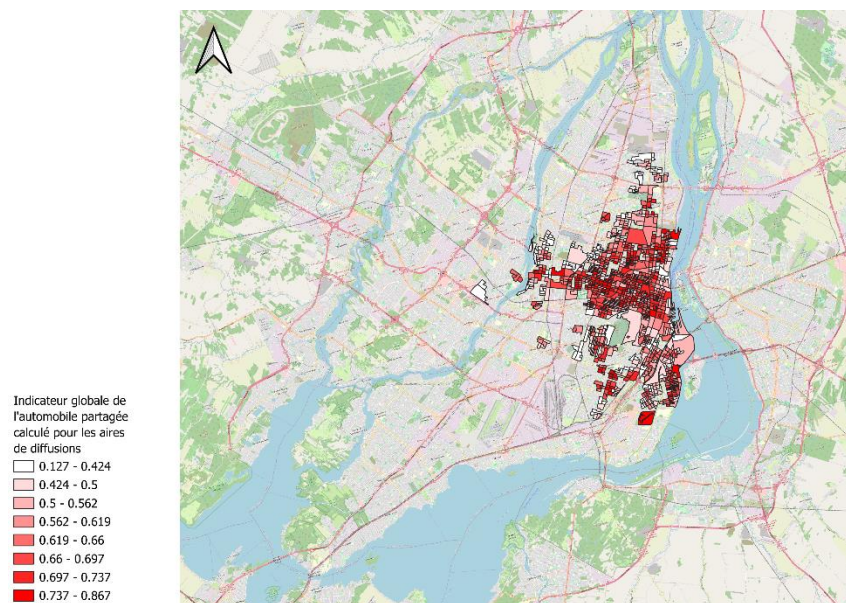


Figure B.7 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les aires de diffusion

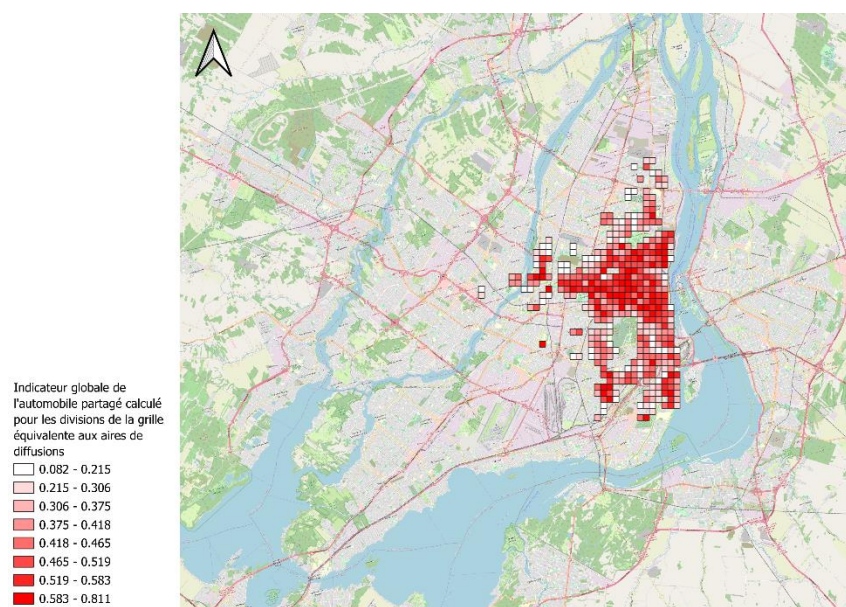


Figure B.8 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

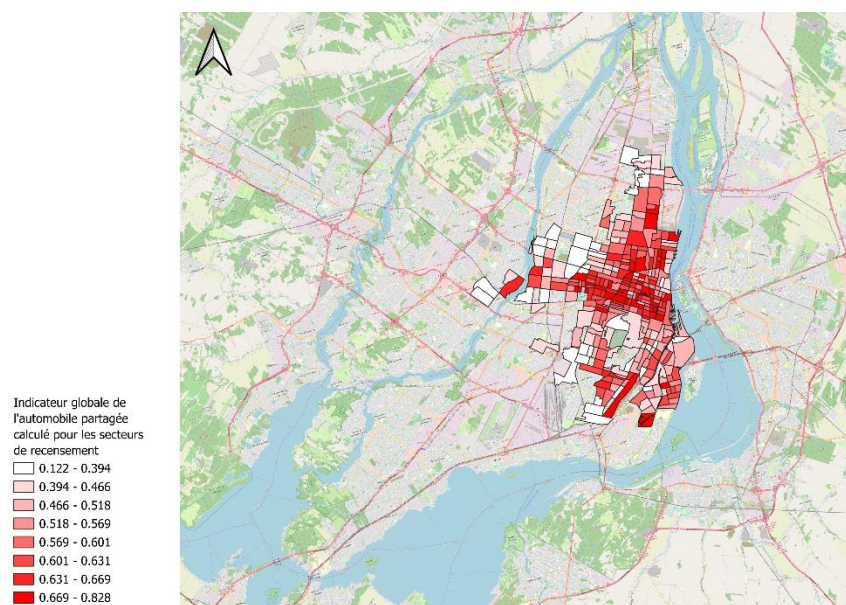


Figure B.9 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les secteurs de recensement

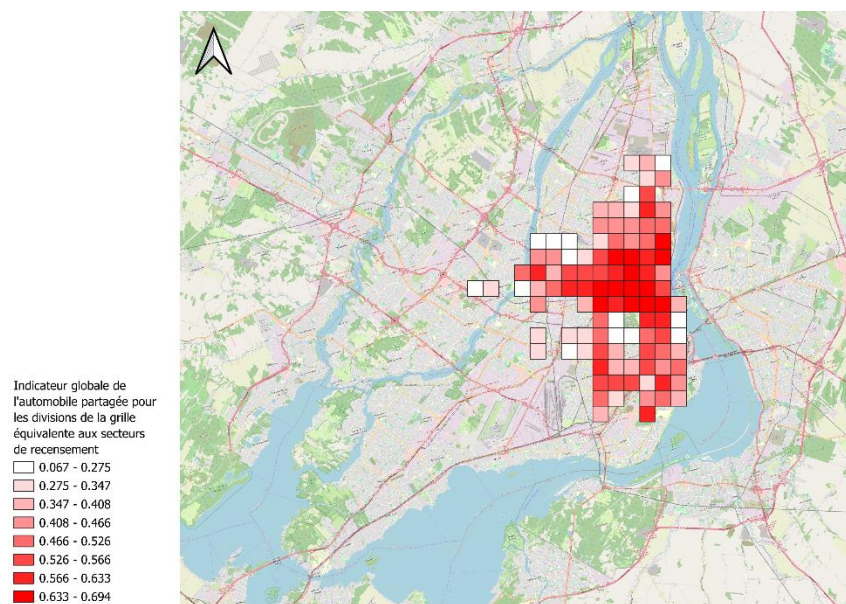


Figure B.10 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

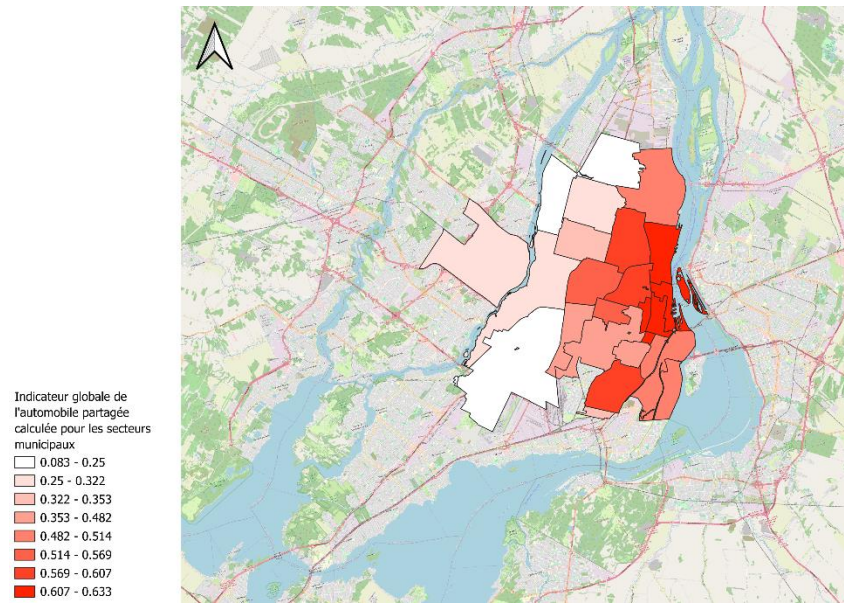


Figure B.11 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les secteurs municipaux

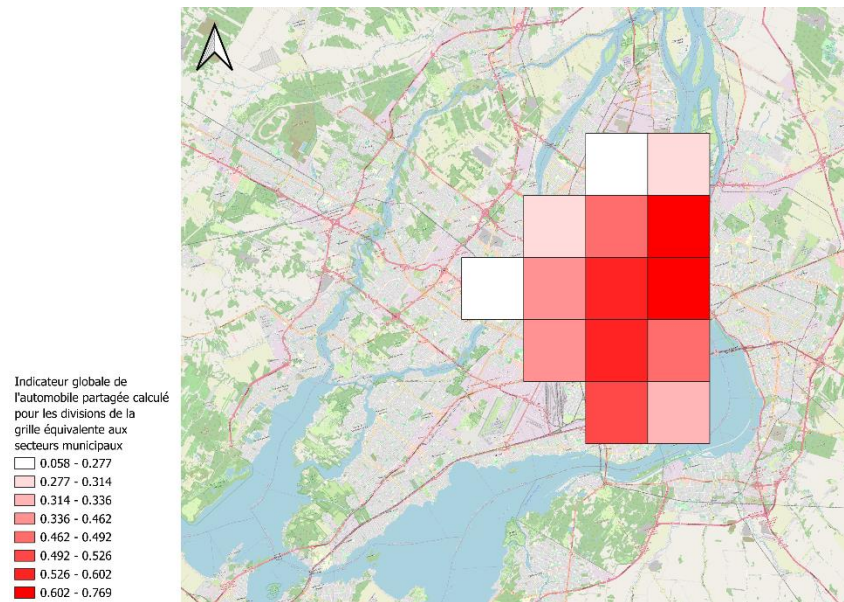


Figure B.12 Distribution de l'indicateur global pour l'autopartage pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

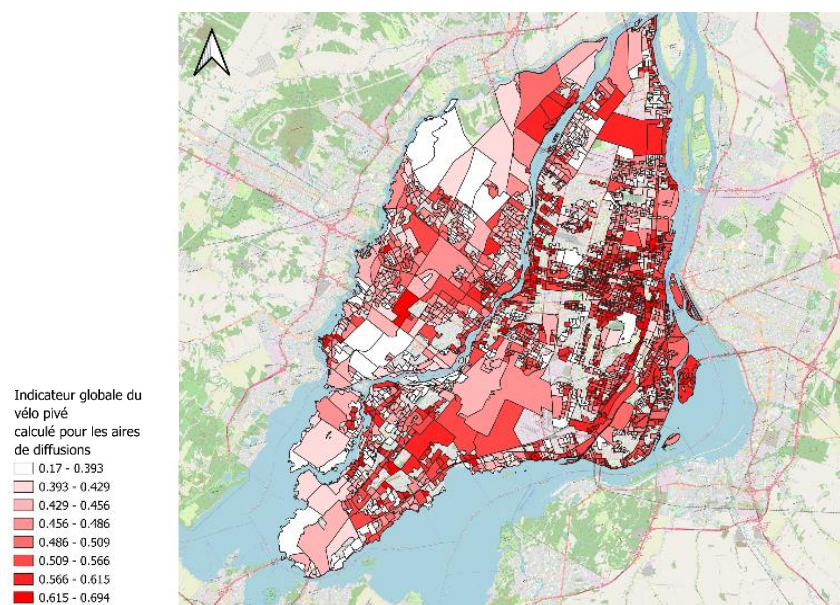


Figure B.13 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les aires de diffusion

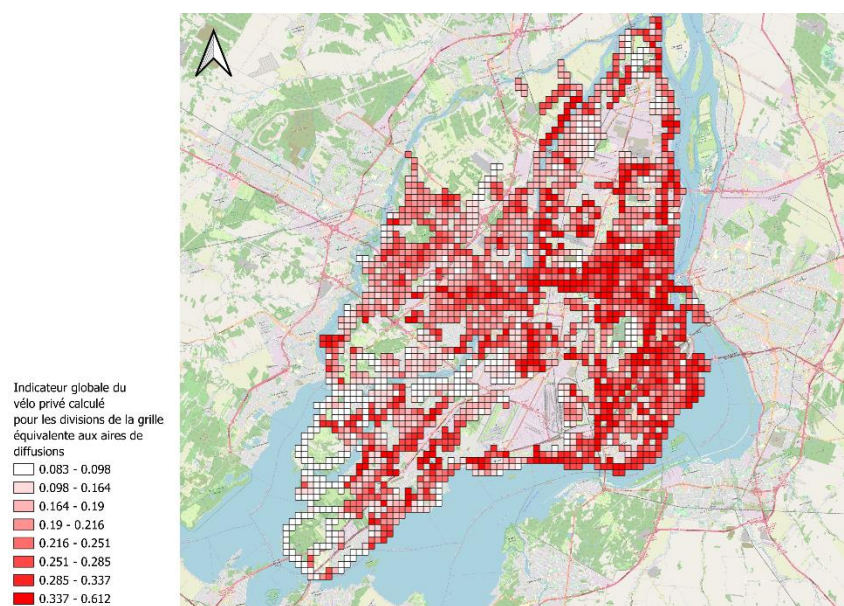


Figure B.14 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

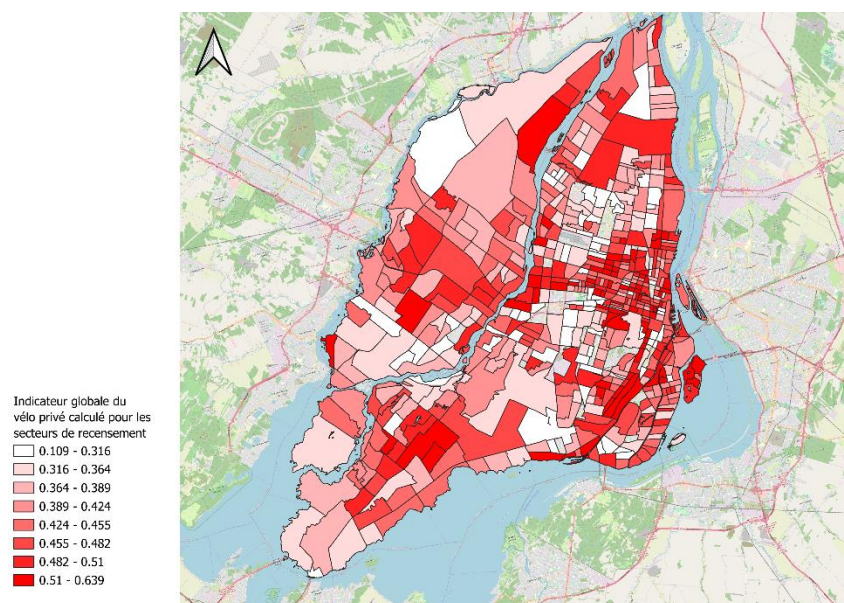


Figure B.15 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les secteurs de recensement

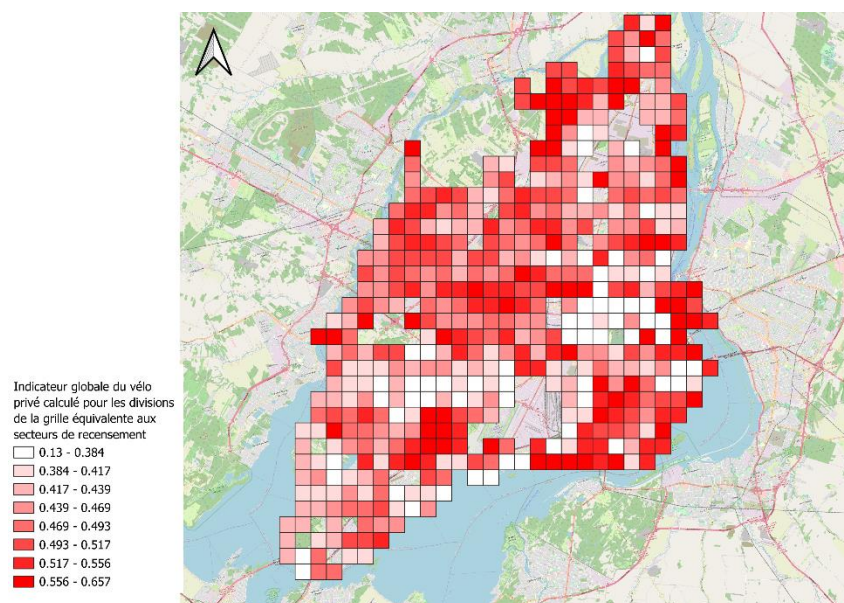


Figure B.16 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

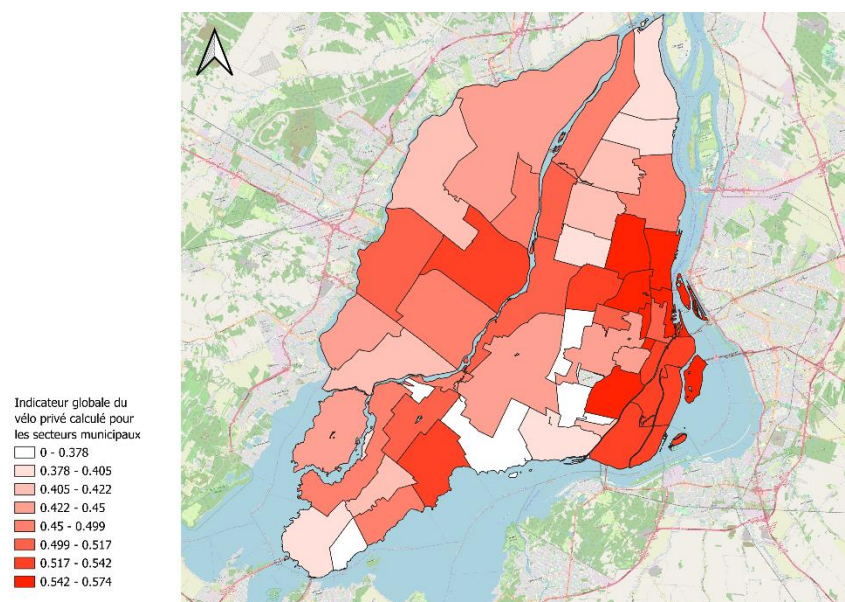


Figure B.17 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les secteurs municipaux

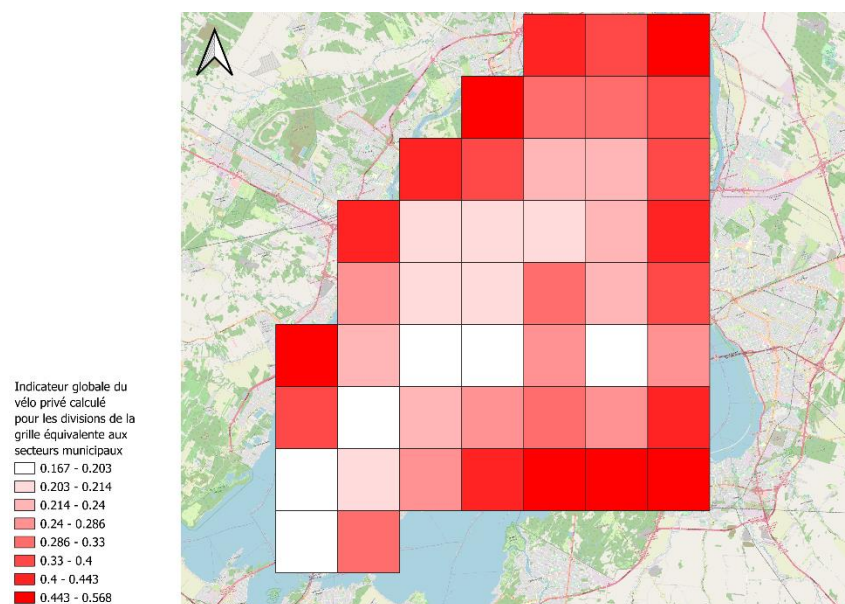


Figure B.18 Distribution de l'indicateur global pour le vélo privé pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

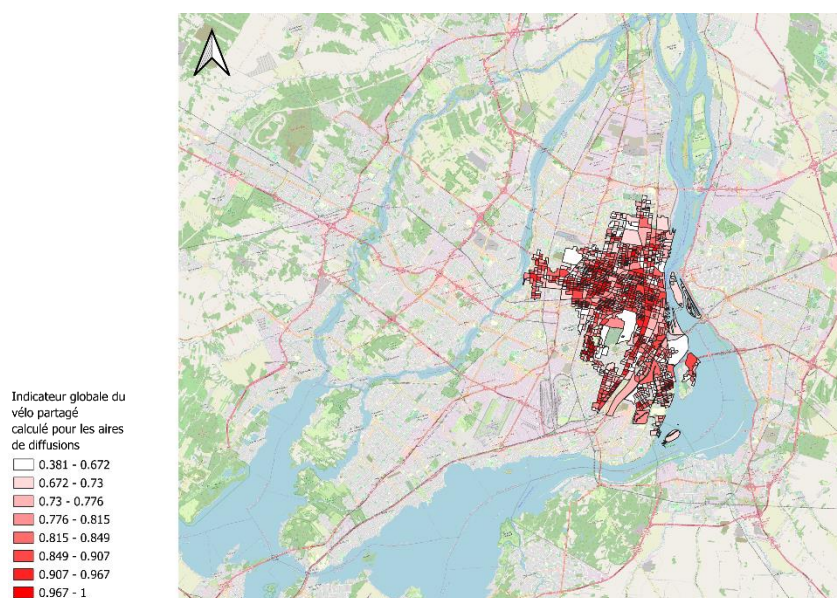


Figure B.19 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les aires de diffusion

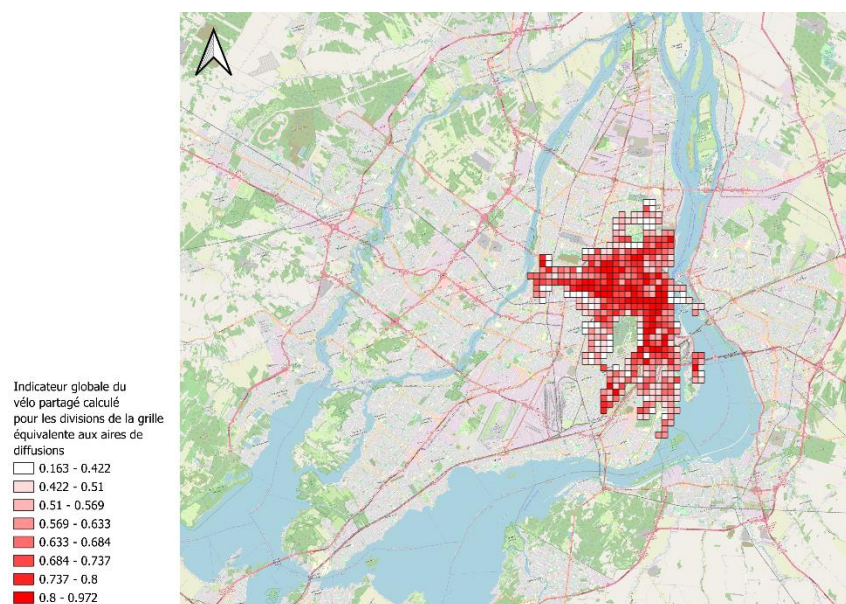


Figure B.20 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

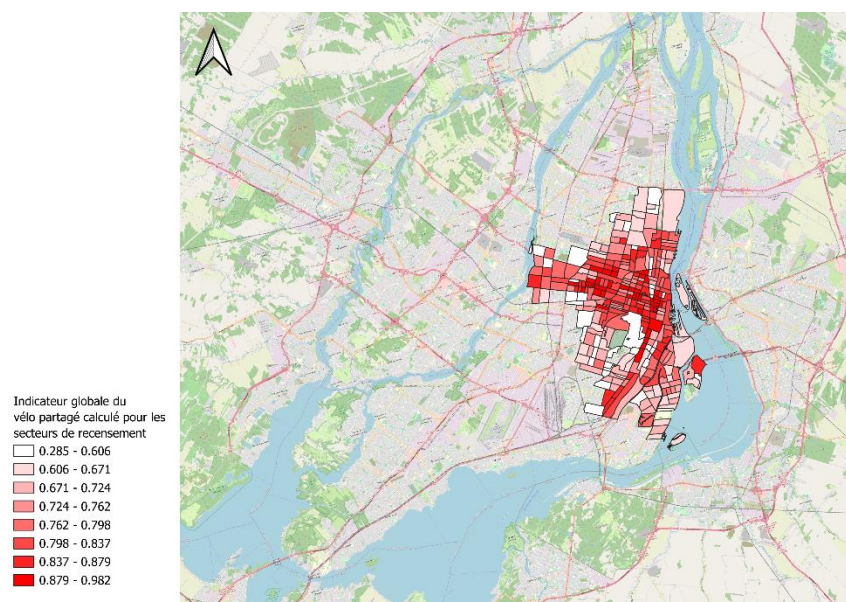


Figure B.21 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les secteurs de recensement

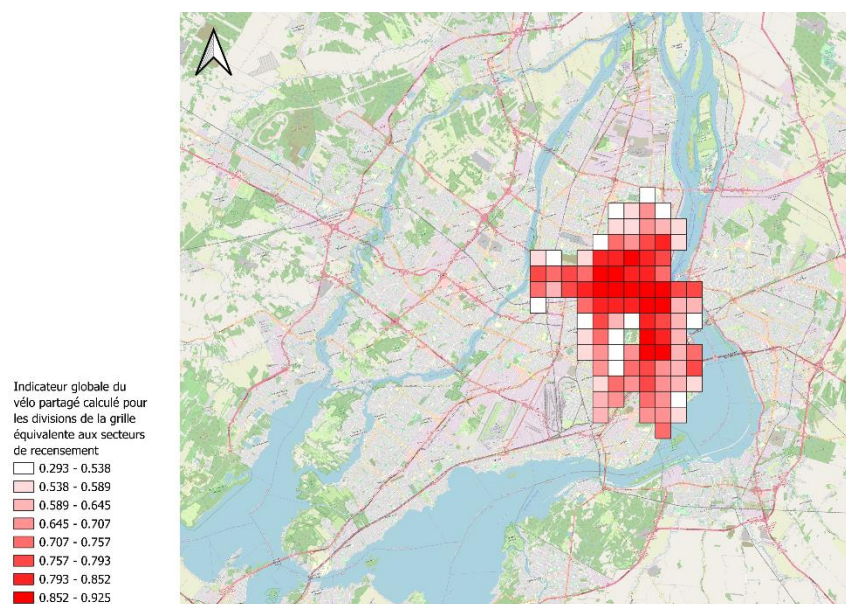


Figure B.22 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

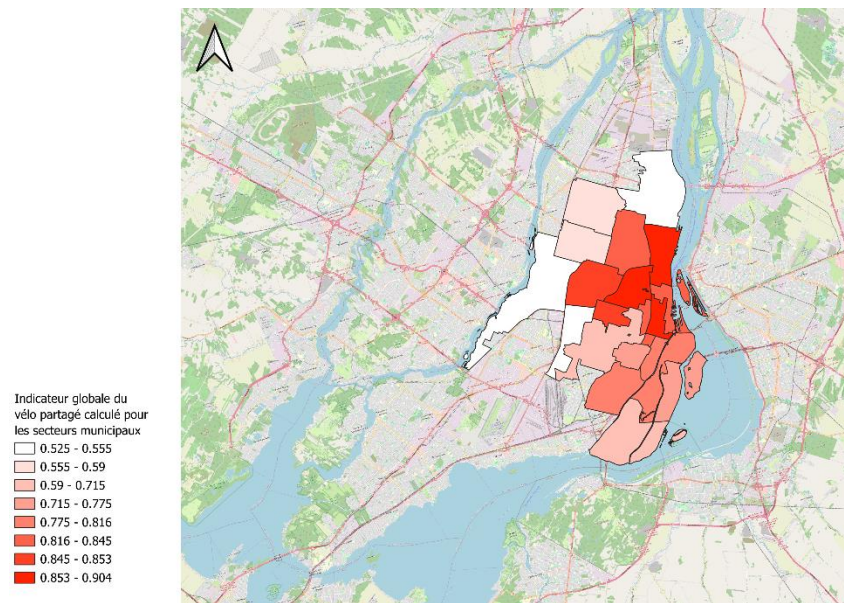


Figure B.23 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les secteurs municipaux

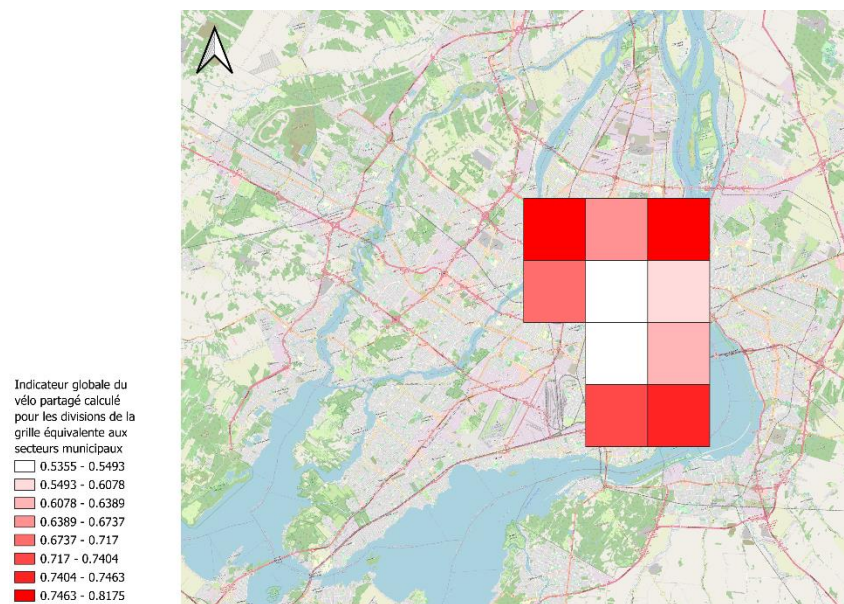


Figure B.24 Distribution de l'indicateur global pour le vélopartage pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

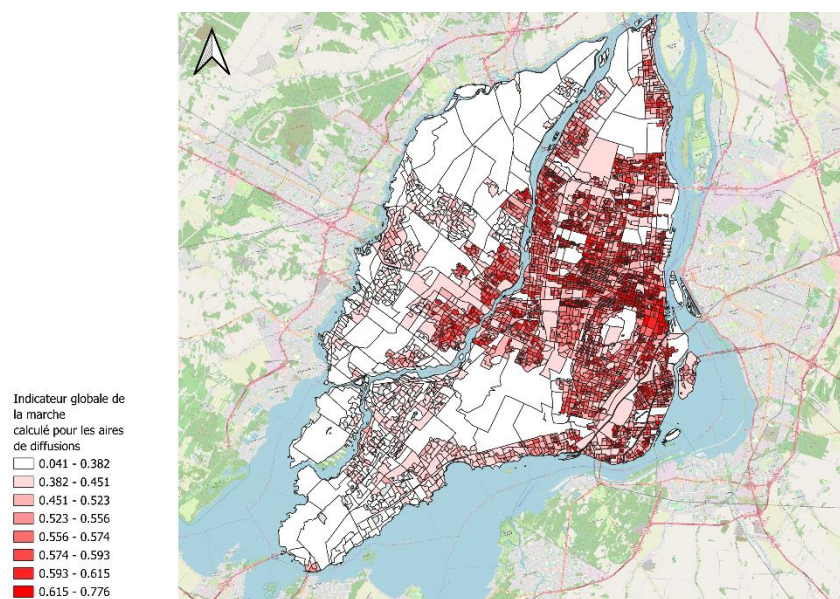


Figure B.25 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les aires de diffusion

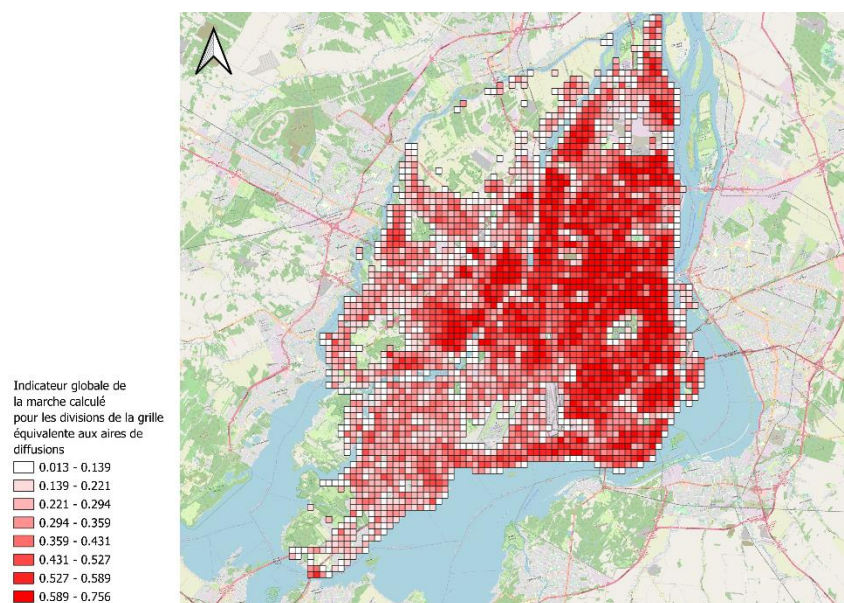


Figure B.26 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

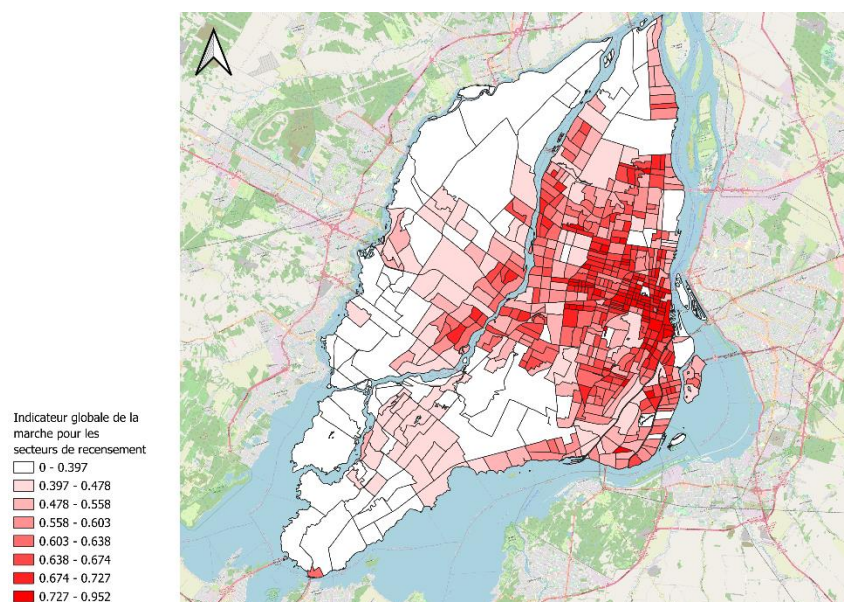


Figure B.27 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les secteurs de recensement

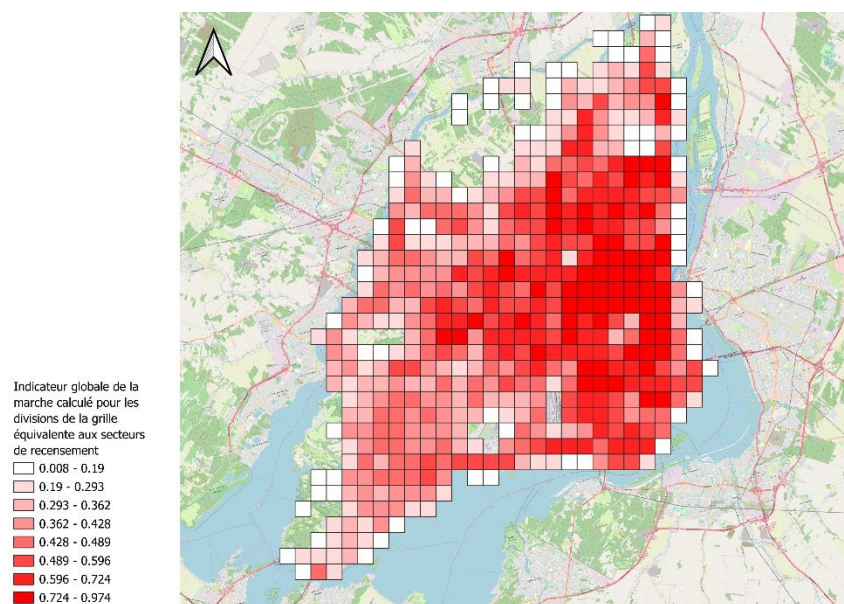


Figure B.28 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

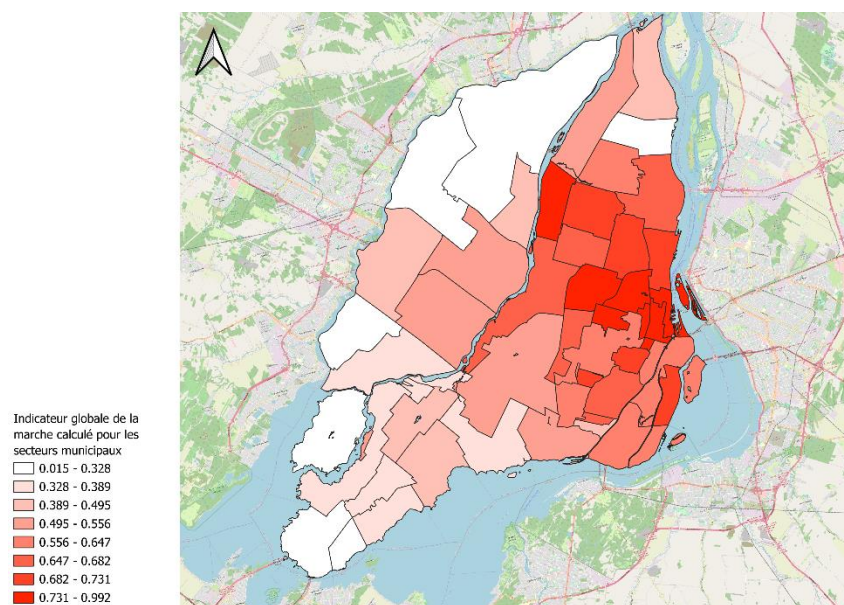


Figure B.29 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les secteurs municipaux

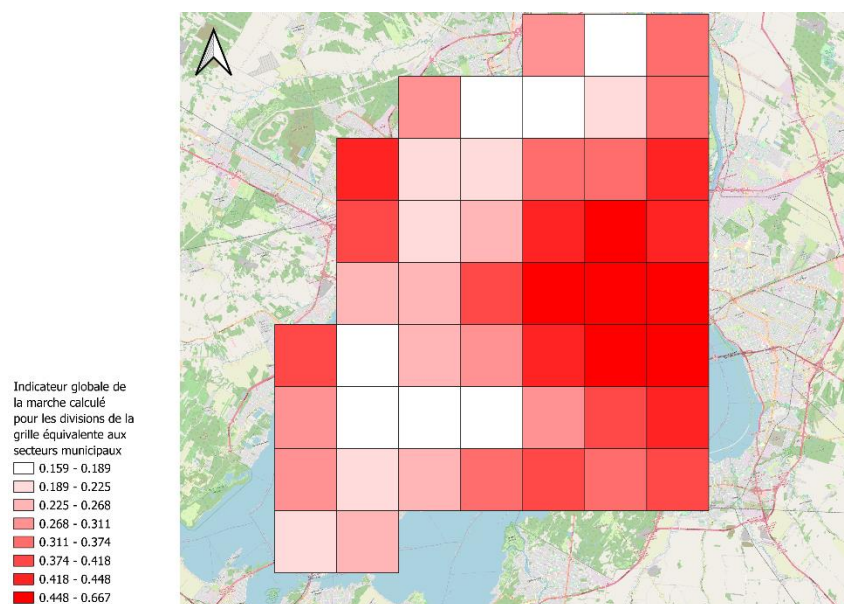


Figure B.30 Distribution de l'indicateur global pour la marche pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

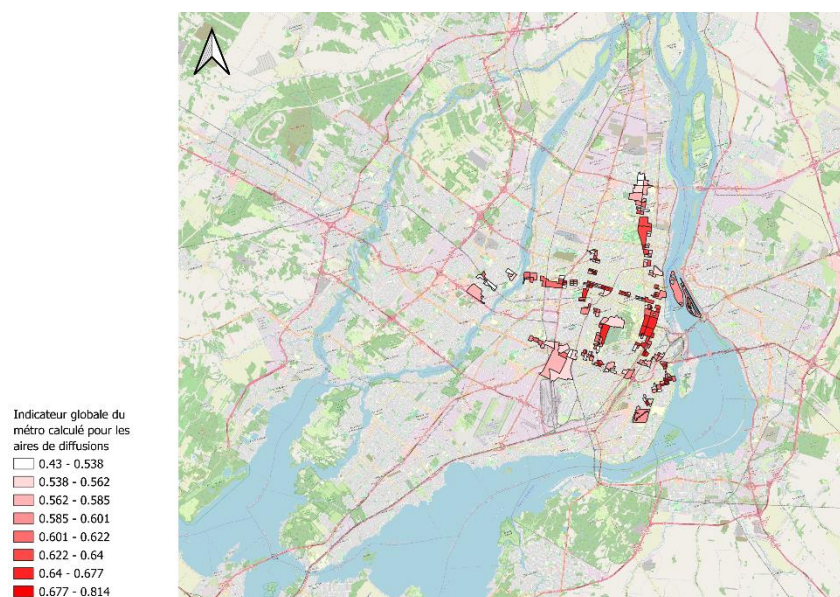


Figure B.31 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les aires de diffusion

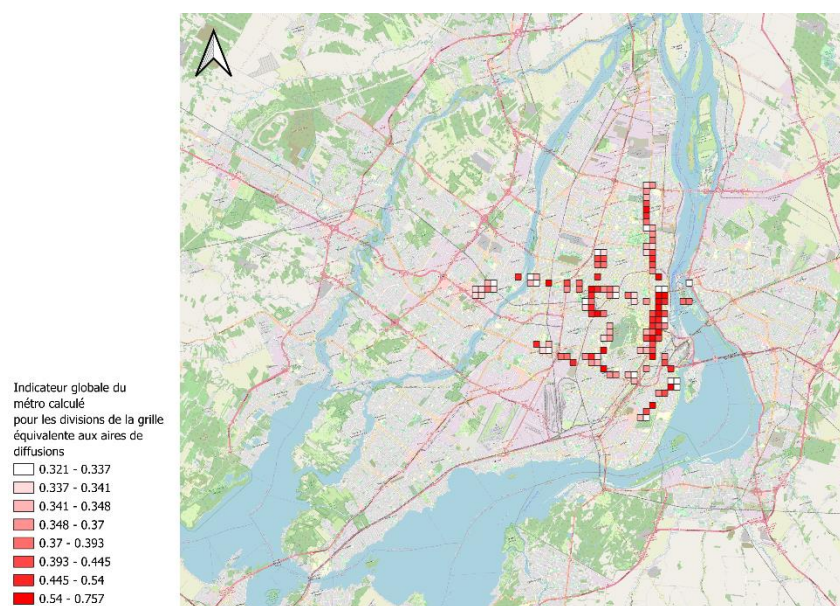


Figure B.32 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

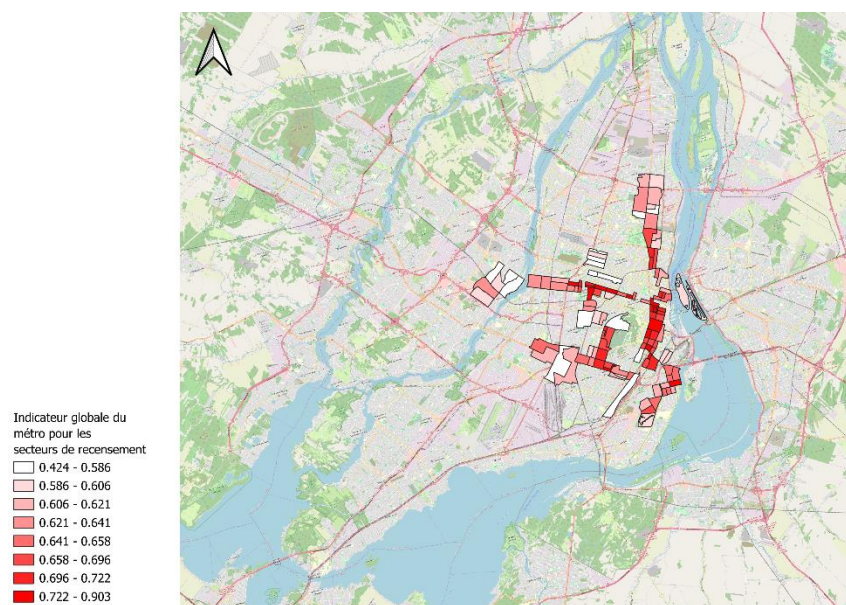


Figure B.33 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les secteurs de recensement

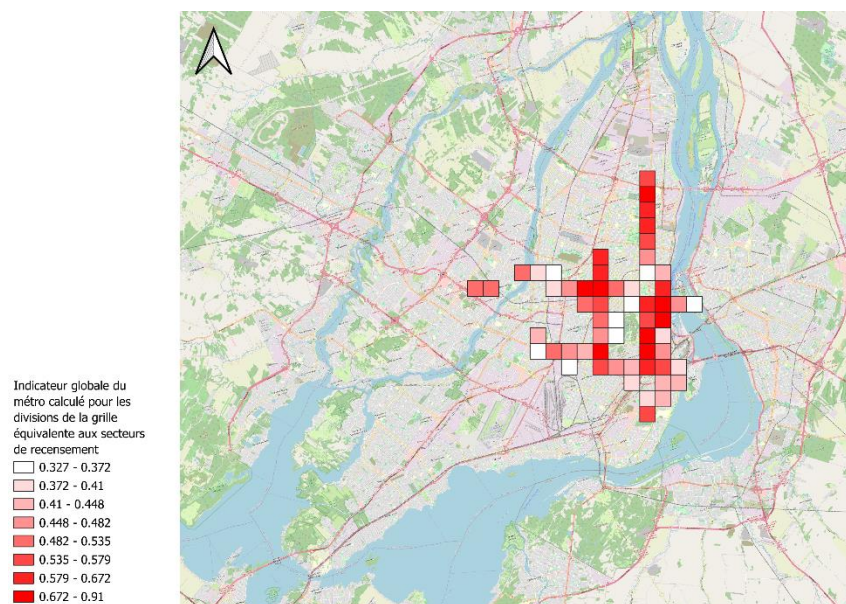


Figure B.34 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

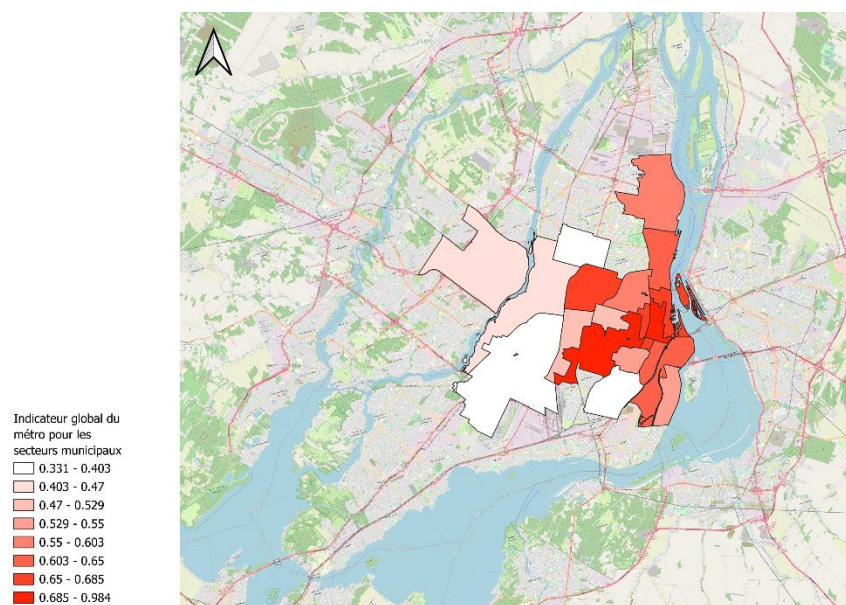


Figure B.35 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les secteurs municipaux

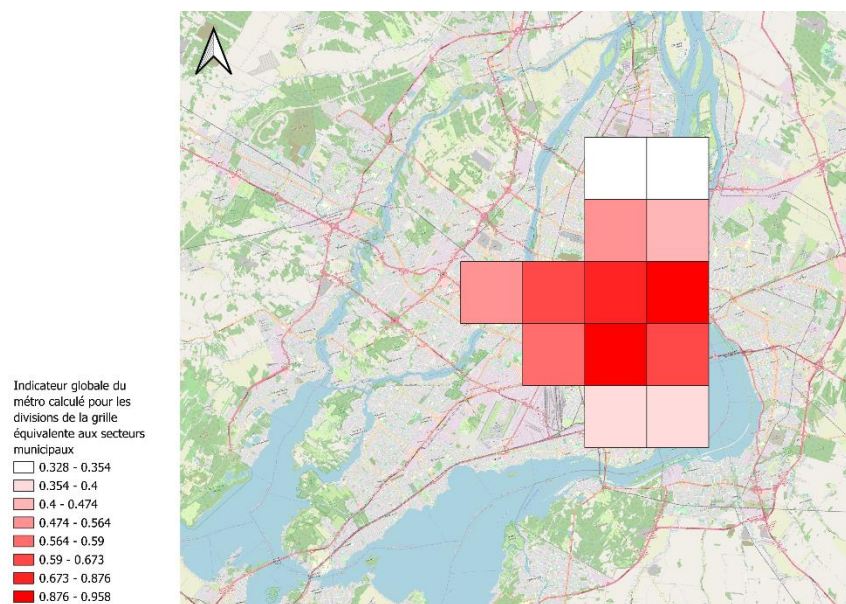


Figure B.36 Distribution de l'indicateur global pour le métro pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

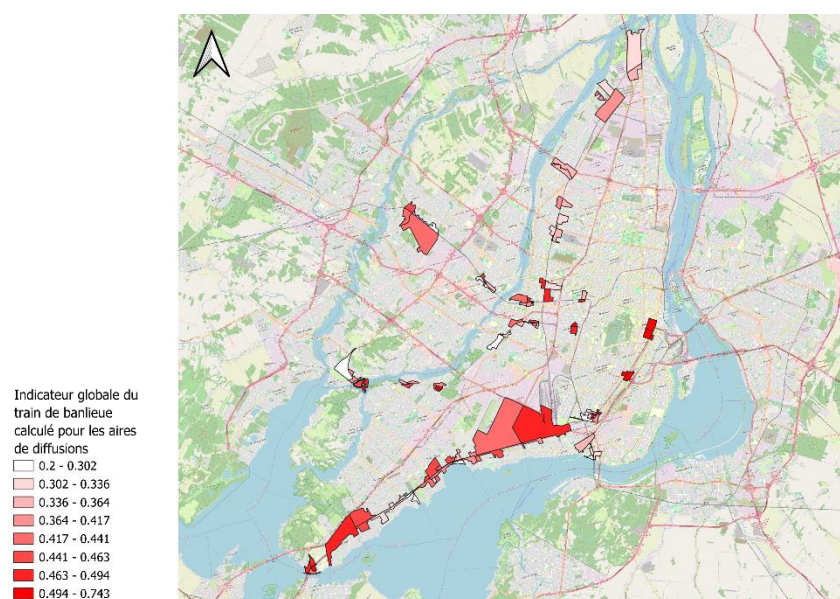


Figure B.37 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les aires de diffusion

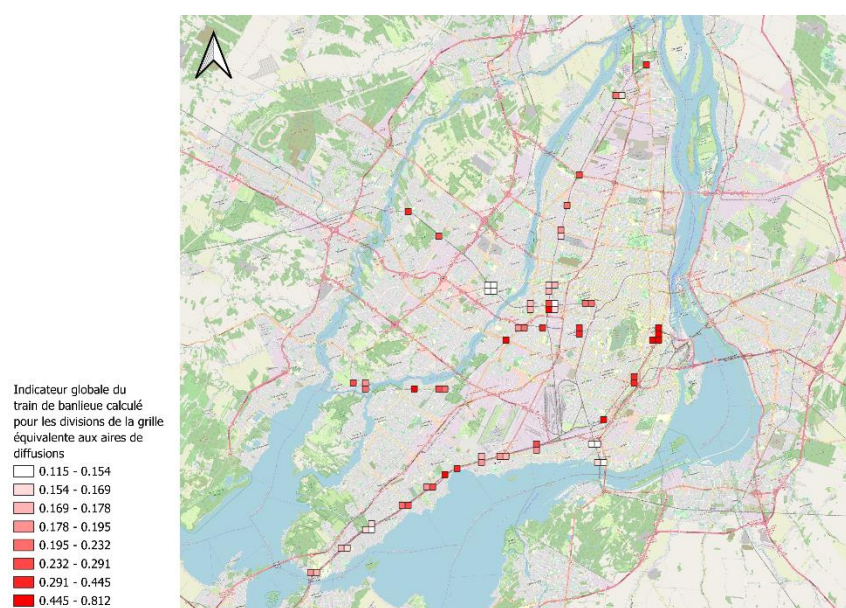


Figure B.38 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

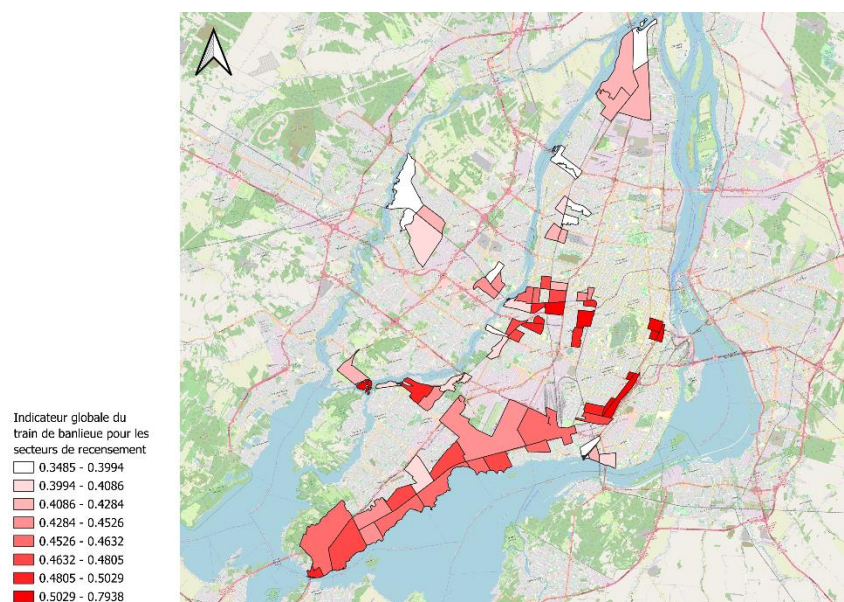


Figure B.39 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les secteurs de recensement

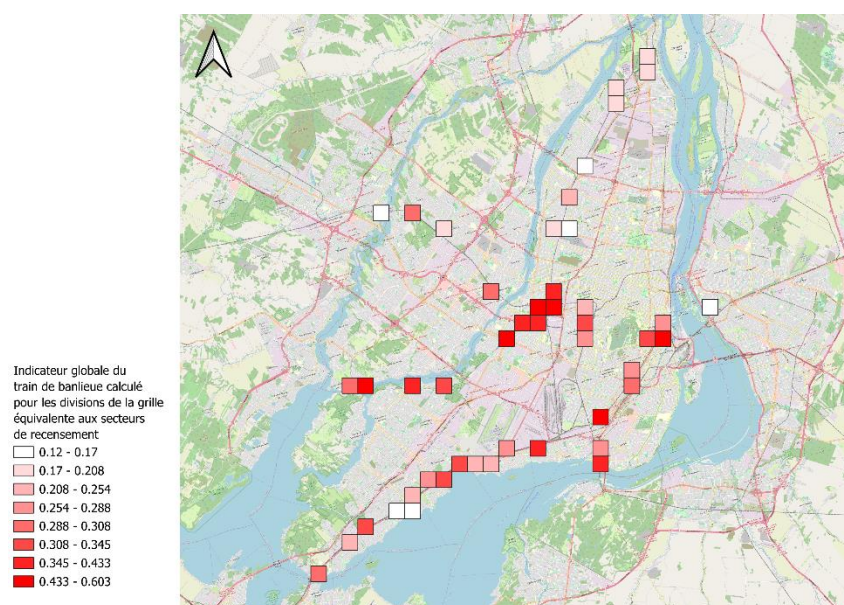


Figure B.40 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

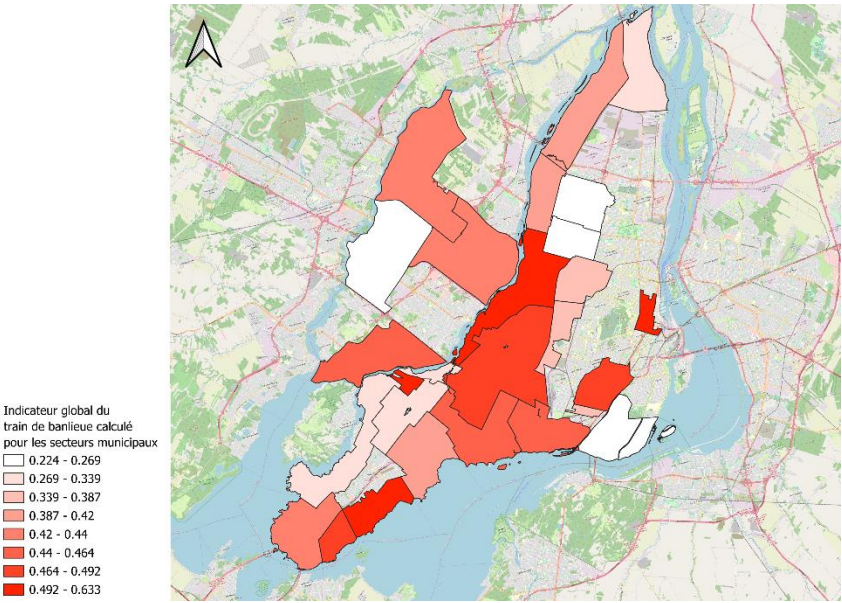


Figure B.41 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les secteurs municipaux

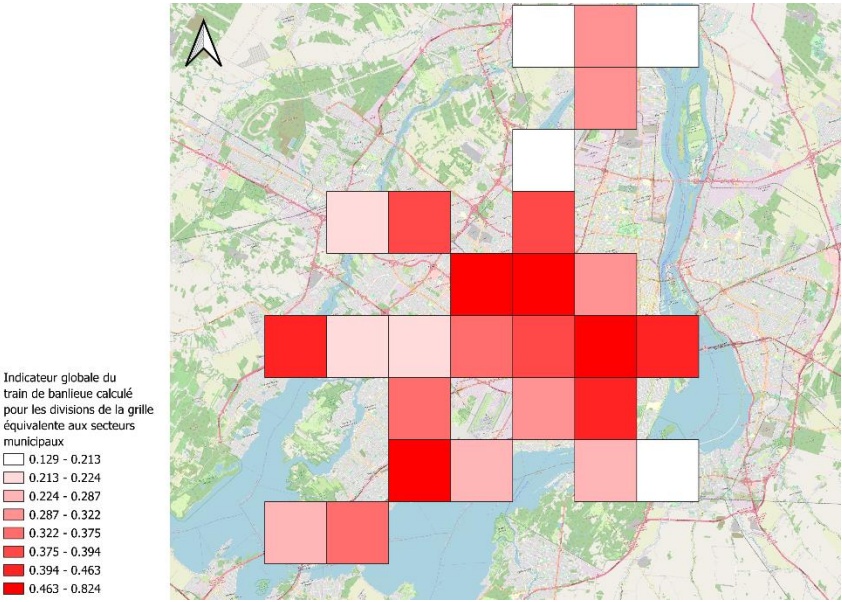


Figure B.42 Distribution de l'indicateur global pour le train de banlieue pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux

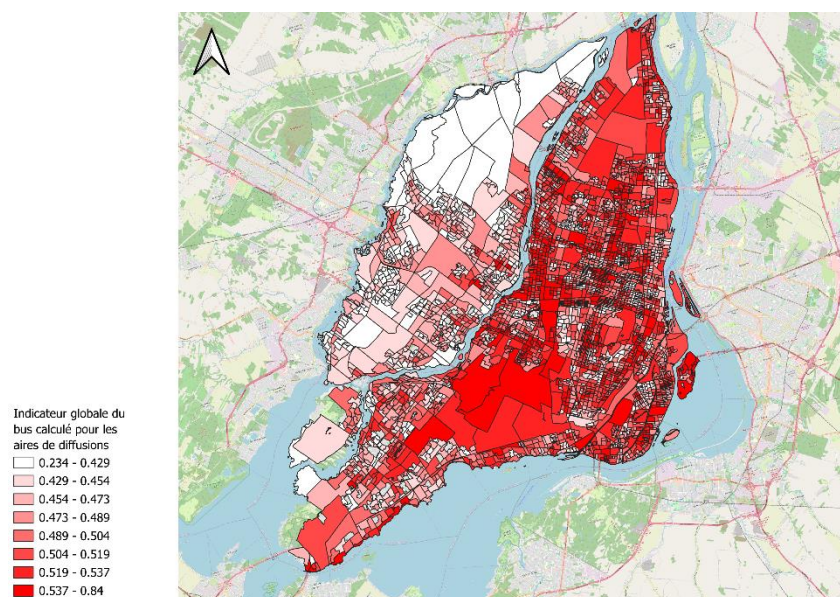


Figure B.43 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les aires de diffusion

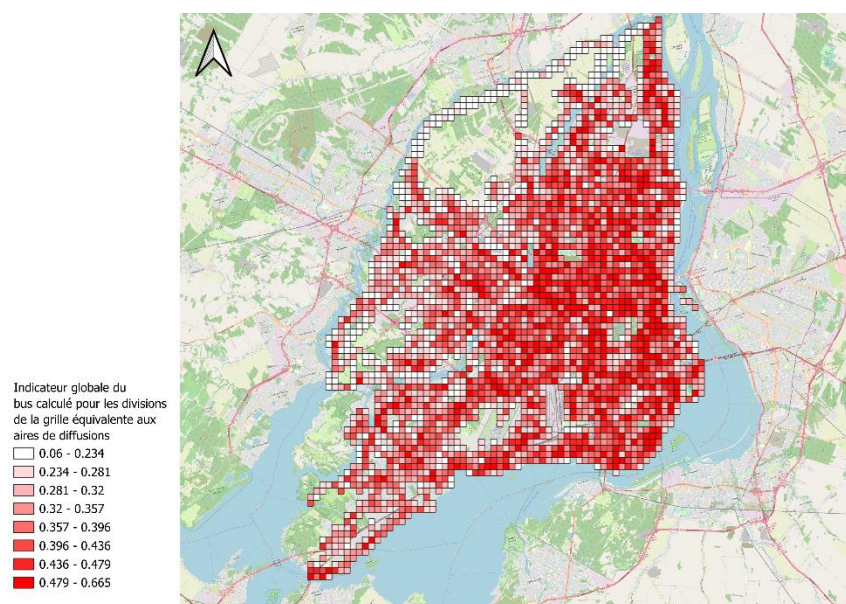


Figure B.44 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux aires de diffusion

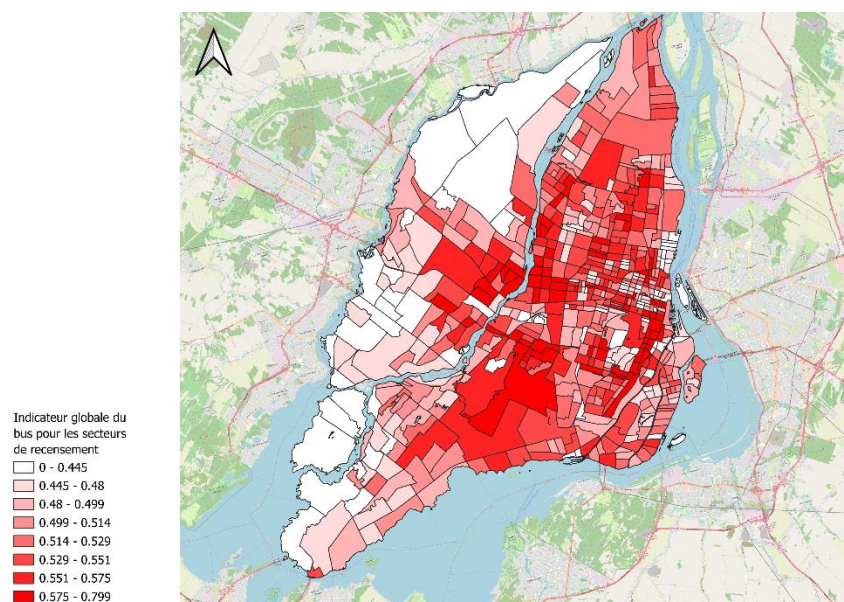


Figure B.45 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les secteurs de recensement

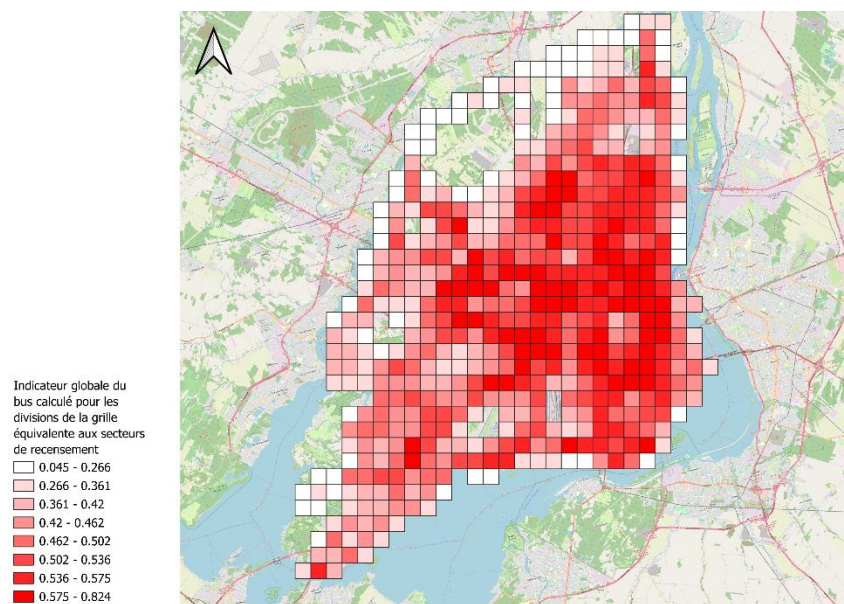


Figure B.46 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de recensement

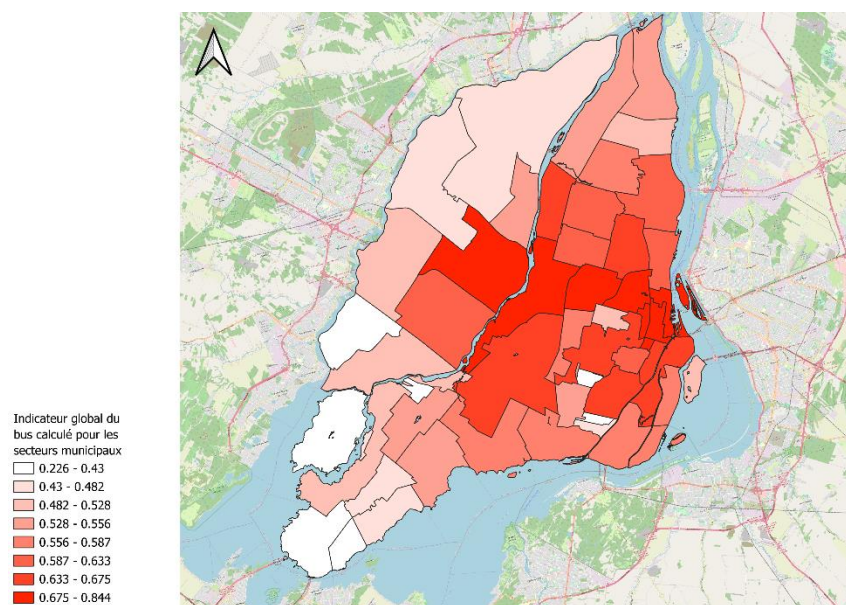


Figure B.47 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les secteurs municipaux

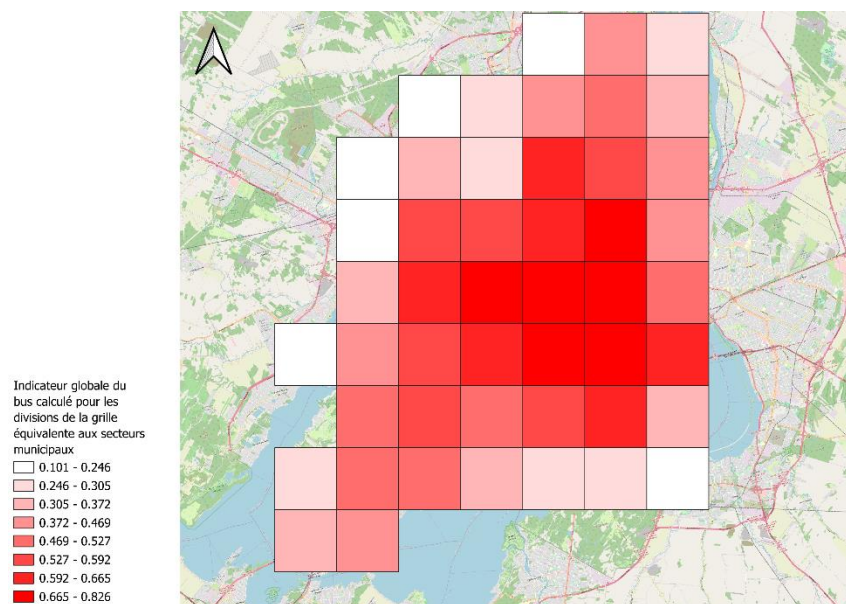


Figure B.48 Distribution de l'indicateur global pour le bus pour les divisions de la grille équivalente aux secteurs de municipaux