



Titre: Analyse des interactions entre étalement urbain, offre et demande en transport
Title:

Auteur: Mohamed Saoudi Hassani
Author:

Date: 2022

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Saoudi Hassani, M. (2022). Analyse des interactions entre étalement urbain, offre et demande en transport [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/10293/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/10293/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Catherine Morency
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Analyse des interactions entre étalement urbain, offre et demande en
transport**

MOHAMED SAOUDI HASSANI

Département de des Génies civil, géologique et des mines

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

Génie Civil

Mars 2022

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Analyse des interactions entre étalement urbain, offre et demande en transport

présenté par **Mohamed SAOUDI HASSANI**

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

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

TRÉPANIÉ Martin, président

MORENCY Catherine, membre et directrice de recherche

BAHBOUH Kinan, membre

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche n'aura certainement pas pu être mené à bien sans l'engagement et l'accompagnement de plusieurs personnes.

Je tiens à remercier particulièrement ma directrice de recherche, Catherine Morency, pour avoir cru en moi et m'avoir confié ce projet, sans son encadrement, ses conseils avisés, son financement, son enthousiasme et sa bonne humeur, ce projet ne serait certainement pas ce qu'il est. Je remercie également tous les acteurs de la Chaire Mobilité de m'avoir éclairé sur les multiples facettes du domaine des transports. Merci à Jean-Simon et Hubert pour leur réactivité et leur aide précieuse pour le traitement des données. Merci au corps professoral de Polytechnique pour la qualité de son enseignement qui m'a permis de maintenir ma curiosité en éveil, de développer mes connaissances et d'asseoir mon esprit d'analyse.

Comment ne pas remercier ma famille pour son soutien continu, merci à mes parents pour leurs encouragements, merci à ma sœur pour sa bonne humeur contagieuse et merci à mon frère pour sa présence et pour les stocks de ToroMatcha qui m'ont maintenu éveillé.

À ma conjointe, Nabila, merci pour ta confiance, ton support, ton amour et ton soutien inébranlable. Merci à Sophie de m'avoir accompagné, tes petits coups de main (et pieds) me redonnent toujours le sourire.

Salutation à Léa pour m'avoir tenu compagnie du haut de ton arbre à chat.

RÉSUMÉ

L'étalement urbain est un phénomène qui prend de plus en plus d'ampleur en transformant le paysage urbain et les habitudes de mobilité des résidents au travers des années. Les réflexions sur le développement durable et la mobilité quotidienne se retrouvent étroitement liées à la compréhension des enjeux qu'engendre ce phénomène. L'anticipation des besoins en mobilité permet d'adopter des décisions éclairées pour le développement de réseaux et infrastructures de transport. Cette anticipation bénéficierait de la compréhension des interactions entre l'étalement urbain, l'offre et la demande en transport. Ce sujet est d'autant plus critique lorsque l'on observe la vitesse de propagation de l'étalement urbain pour les régions canadiennes, qui connaissent une augmentation bien plus rapide en banlieue qu'en centre-ville urbain (D. Gordon et al. 2018).

Cette recherche propose un éclairage sur les interactions entre trois grandes sphères : étalement urbain, offre en transport et demande en transport. La notion d'étalement urbain peut sembler intuitive, mais il s'agit d'un phénomène dont les définitions et les mesures varient. La caractériser objectivement nécessite une synthèse des définitions et des mesures de calcul. La méthodologie générale adoptée consiste en l'analyse séparée des trois sphères dans un premier temps puis d'une analyse croisée des résultats obtenus pour clarifier les impacts et effets combinés des évolutions observées.

L'un des objectifs de cette recherche est donc de caractériser cet étalement urbain, grâce notamment à une revue de littérature exhaustive. La méthodologie adoptée permet de synthétiser les diverses définitions et dimensions couvertes par des travaux antérieurs. La finalité est de développer une typologie unique permettant de séparer le territoire en fonction de zones ayant des profils de croissance urbaine particuliers.

L'affectation de typologies d'étalement urbain passe par un découpage temporellement immuable du territoire. À ce découpage sont affectées des variables caractérisant l'évolution de l'offre en transport et l'évolution de la demande.

Le calcul d'indicateurs d'étalement urbain retenus à travers la revue de littérature permet de recréer, grâce à leurs valeurs centrales et réduites, 7 types différents. La typologie n'a pas pour objectif de classer les territoires du plus au moins étalé. Certes, les territoires en banlieue se démarquent des territoires centraux, mais le fait de synthétiser diverses définitions d'étalement urbain permet plutôt de créer une typologie classifiant les secteurs en fonction de leur schéma d'utilisation de l'espace.

Pour caractériser l'offre en transport, l'offre routière est considérée. Le calcul d'indicateurs d'évolution de l'offre permet une mise en perspectives avec le phénomène d'étalement urbain d'une part et avec l'évolution de la demande d'autre part. La méthode adoptée passe par la reconstruction de réseaux routiers historiques afin d'affecter rétroactivement des capacités routières aux segments. Les modifications apportées aux capacités permettent de déceler par la suite les secteurs ayant connu une évolution et de les comparer aux types d'étalement urbain du territoire. L'un des principaux enjeux de cette méthode est la difficulté de reconstruction des données historiques, enjeu dû principalement aux différences de codification et géométrie observée entre les années pour une même base de données. D'intéressantes méthodologies de jointure sont testées et une image du réseau routier historique est reconstituée avec 83% de fiabilité.

La méthode d'analyse de la demande et de son évolution passe par l'analyse des véhicules-kilomètres totaux consommés par les résidents. Les calculs se font grâce au traitement des données des enquêtes Origine-Destination (OD), l'éclairage amené sur l'évolution de cette variable permet de mieux analyser l'impact d'appartenance à un type sur la demande induite. Les résultats démontrent que la demande ne fait pas qu'augmenter sur l'ensemble du territoire, mais varie bel et bien en fonction des typologies des secteurs et de leur emplacement. Des baisses ont par exemple été relevées au niveau de la couronne sud et pour des secteurs qui présentent une concentration locale.

Pour établir une analyse croisée, un calcul d'élasticité s'impose comme mesure simple à interpréter et à comparer entre territoires. Mesurer l'élasticité de l'évolution de la demande par rapport à l'évolution de l'offre par type de secteur permet de combiner les trois mesures et de déceler l'impact de l'étalement urbain. Il ressort de cette analyse que les secteurs qui se concentrent localement sur eux-mêmes se distinguent des autres types en raison de leurs élasticités négatives.

La réflexion se poursuit à travers l'analyse d'indicateurs de mobilité pour l'ensemble des types, avec une analyse plus rapprochée pour les secteurs concentrés représentant près de 50% du territoire analysé. Les résultats obtenus démontrent que la typologie d'étalement urbain permet effectivement de capter des différences de comportement de mobilité des résidents, telles les distances moyennes de déplacement, qui n'ont connu une baisse que pour les secteurs qui se sont concentrés.

Ce travail permet d'apporter simultanément un éclairage et une méthodologie d'analyse des interactions entre étalement urbain et offre et demande en transport. Que ce soit à travers la

typologie développée, le modèle de régression exploré ou les indicateurs calculés et analysés, les constats sont nombreux et balisent la voie à l'approfondissement de la réflexion. L'amélioration de la compréhension de ces interactions ne peut que bénéficier à la prise de décision en mobilité.

ABSTRACT

Urban sprawl is a phenomenon that is becoming more and more widespread, transforming the urban landscape and the mobility habits of residents over the years. Reflections on sustainable development and daily mobility are closely linked to understanding the challenges that this phenomenon generates. Anticipating mobility needs enables informed decisions to be made for the development of transport networks and infrastructures. This anticipation would benefit from understanding the interactions between urban sprawl, transport supply and demand. This subject is all the more critical when we observe the speed of propagation of urban sprawl for the Canadian areas, which is growing much faster in the suburbs than in the urban city center (D. Gordon et al. 2018).

This research sheds light on the interactions between three major spheres: urban sprawl, transport supply and transport demand. The notion of urban sprawl may seem intuitive, but it is a phenomenon whose definitions and measures vary. To characterize it objectively requires a synthesis of definitions and calculation measures. The general methodology adopted consists of the separate analysis of the three spheres first and then a cross-analysis of the results obtained to clarify the combined impacts and effects of the changes observed.

One of the objectives of this research is therefore to characterize this urban sprawl, in particular through an exhaustive literature review. The methodology adopted makes it possible to synthesize the various definitions and dimensions covered by previous work. The aim is to develop a unique typology making it possible to separate the territory according to zones with particular urban growth profiles.

The assignment of types of urban sprawl goes through a temporally immutable division of the territory. Variables characterizing the evolution of transport supply and the evolution of demand are assigned to this breakdown.

The calculation of urban sprawl indicators retained through the literature review allows to recreate, thanks to their central and reduced values, 7 different types. The aim of the typologies is not to classify the territories from the most to the least spread out. Admittedly, the suburban territories stand out from the central territories, but the fact of synthesizing various definitions of urban sprawl makes it possible rather to create a typology classifying the sectors according to their pattern of urban space use.

To characterize the transport supply, the road supply is considered. The calculation of road capacity evolution allows a perspective with respect to urban sprawl on the one hand and with the evolution of travel demand on the other hand. Historical road network is considered to retroactively allocate road capacities to segments. The modifications made to the capacities make it possible to identify subsequently the sectors which have undergone an evolution and to compare them with the types of urban sprawl. One of the main challenges of this method is the difficulty of reconstructing historical data, mainly due to the differences in codification and geometry observed between years for the same database. Interesting joining methodologies are tested and an image of the historic road network is reconstructed with 83% reliability.

The method of analyzing travel demand and its evolution involves analyzing the total vehicle-kilometers consumed by residents. The calculations are made thanks to the processing of data from the Origin-Destination (OD) surveys, the light shed on the evolution of this variable makes it possible to better analyze the impact of belonging to a type on the demand. The results show that demand does not only increase over the entire territory but does indeed vary according to the type of sectors and their location. For example, reductions have been noted at the level of the southern shore and for sectors which present a local concentration.

To establish a cross-analysis, an elasticity calculation is essential as a simple measure to interpret and compare territories. Measuring the elasticity in demand with respect to changes in supply by sector typology makes it possible to combine the three measures and to detect the impact of urban sprawl. It emerges from this analysis that the sectors which local concentration stand out from the rest of the types by their negative elasticities.

The reflection is continued through the analysis of mobility indicators for all the typologies, with a closer analysis for the concentrated sectors who represents nearly 50% of the analyzed territory. The results obtained show that the typologies of urban sprawl effectively make it possible to capture differences in the mobility behavior of residents, such as average travel distances, which have only fallen for concentrated sectors.

This work simultaneously sheds light and bring an analysis methodology on the interactions between urban sprawl and transport supply and demand. Whether through the various typologies developed, the regression model explored or the indicators calculated and analyzed, the findings

are numerous and pave the way for further reflection. Improving the understanding of these interactions can only benefit sustained mobility decision.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	X
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectif & hypothèses	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Étalement urbain	4
2.1.1 Prolifération urbaine pondérée	4
2.1.2 Indicateurs de Frenkel et Orenstein (2011)	6
2.1.3 Concept de dispersion	8
2.1.4 Indicateur d'accessibilité pondéré.....	8
2.1.5 Indicateurs OCDE	9
2.1.6 Indicateurs de Galster et al. (2001)	10
2.1.7 Indicateurs d'Ewing, Pendall et Chen (2003)	13
2.2 Offre routière en transport.....	14
2.3 Demande en transport.....	15
2.3.1 Impacts de la sociodémographie et de l'utilisation du sol	15

2.3.2	Impact de l'augmentation de capacité routière	16
2.4	Synthèse	17
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		18
3.1	Découpage du territoire	18
3.2	Indicateurs d'étalement urbain	21
3.2.1	Indicateur de dispersion	22
3.2.2	Indicateur de densité	22
3.2.3	Indicateur de concentration	23
3.2.4	Indicateur de continuité	24
3.2.5	Indicateur de centralité	25
3.3	Typologie d'étalement urbain	26
3.4	Offre en transport	28
3.4.1	Réseau routier Motrem	28
3.4.2	Fichier principal des rues	40
3.4.3	Réseau Adresses Québec (AQ)	40
3.4.4	Réseau Canvec	40
3.5	Demande en transport	48
CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉSULTATS		52
4.1	Portrait de l'étalement urbain	52
4.1.1	Dispersion	52
4.1.2	Densité	56
4.1.3	Concentration	58
4.1.4	Continuité	61
4.1.5	Centralité	64

4.1.6	Analyse de l'évolution du territoire	67
4.2	Analyse de l'offre	76
4.3	Analyse de la demande.....	82
4.3.1	Analyse des VKT consommés	82
4.3.2	Modèle explicatif.....	89
4.4	Analyse croisée	94
4.4.1	Constats	94
4.4.2	Élasticités	100
4.4.3	Indicateurs de mobilité	107
CHAPITRE 5	CONCLUSION	119
5.1	Synthèse des travaux	119
5.2	Contributions	121
5.2.1	Estimation d'indicateurs d'étalement et développement d'une typologie	121
5.2.2	Évaluation du potentiel de différentes sources pour caractériser l'évolution de l'offre routière	121
5.2.3	Impact de l'étalement urbain sur la demande en transport	122
5.3	Limitations et perspectives.....	123
RÉFÉRENCES	125
BIBLIOGRAPHIE	128
ANNEXES	131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Trace de la construction du découpage unique du territoire :	20
Tableau 3.2 Valeurs centrales des indicateurs par type	27
Tableau 3.3 Définitions simplifiées des types d'étalement urbain	28
Tableau 3.4 Comparatif de la performance de jointure en fonction des longueurs de segments...46	
Tableau 3.5 Capacité la plus fréquente par classe de segment routier – Motrem 2016	46
Tableau 3.6 Table d'équivalence entre segments Motrem et Canvec	47
Tableau 4.1 Part occupé par type d'étalement urbain.....	71
Tableau 4.2 Palmarès de la transformation des secteurs	74
Tableau 4.3 Statiques des variables du modèle de régression.....	90
Tableau 4.4 Résultats du test VIF	92
Tableau 4.5 Coefficients du modèle de régression	93
Tableau 4.6 Statistiques d'appartenance par type de la population non mobile.....	113

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Méthodologie générale	3
Figure 3.1 Découpages du territoire.....	20
Figure 3.2 Méthode des K-moyennes	27
Figure 3.3 Méthode du dendrogramme	27
Figure 3.4 Comparaisons des réseaux routiers Motrem 2003 et 2016	30
Figure 3.5 Composition du réseau Motrem avant jointure.....	32
Figure 3.6 Capacités minimales observées avant jointure - réseau Motrem	33
Figure 3.7 Capacités maximales observées avant jointure - réseau Motrem	33
Figure 3.8 Analyse rapprochée du réseau routier Motrem 2003-2016 – cas de l'A30 est	34
Figure 3.9 Compositions du réseau routier Motrem 2003-2016 – cas d'un secteur	35
Figure 3.10 Méthodologie de jointure appliquée au réseau Motrem	36
Figure 3.11 Composition du réseau Motrem après jointure.....	37
Figure 3.12 Exemple d'une fiche générée pour un secteur - réseau Motrem – statistiques.	38
Figure 3.13 Exemple d'une fiche générée pour un secteur - réseau Motrem – réseau	39
Figure 3.14 Classifications du réseau historique Canvec.....	41
Figure 3.15 Classifications du réseau supérieur Canvec	42
Figure 3.16 Illustration des réseaux de 2015 et 2009 - Canvec	43
Figure 3.17 Découpage en tronçons de 100 m – réseau 2015	44
Figure 3.18 Découpage en tronçons de 100 m - réseau 2009	44
Figure 3.19 Angles retenus pour la jointure spatiale - Canvec	45
Figure 4.1 Distribution de l'indicateur de dispersion	53
Figure 4.2 Répartition des valeurs de l'indicateur de dispersion par secteur - 2016	54
Figure 4.3 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de dispersion par secteur	55

Figure 4.4 Distribution de l'indicateur de densité	56
Figure 4.5 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de densité par secteur	57
Figure 4.6 Distribution de l'indicateur de concentration	58
Figure 4.7 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de concentration par secteur.....	59
Figure 4.8 Distribution de l'indicateur de continuité.....	61
Figure 4.9 Valeurs de l'indicateur de continuité par secteur pour 2016.....	62
Figure 4.10 Évolution en % de l'indicateur de continuité	63
Figure 4.11 Distribution de l'indicateur de centralité.....	64
Figure 4.12 Valeurs de l'indicateur de centralité par secteur pour 2016	65
Figure 4.13 Évolution en % des valeurs de l'indicateur de centralité par secteur	66
Figure 4.14 Typologie d'étalement urbain par secteur - 2016.....	67
Figure 4.15 Évolutions de la typologie d'étalement urbain par secteur	69
Figure 4.16 Diagrammes d'évolution des typologies d'étalement urbain.....	70
Figure 4.17 Évolution des parts occupées par type d'étalement urbain	72
Figure 4.18 Palmarès de la transformation des secteurs	73
Figure 4.19 Classification du réseau historique Canvec	76
Figure 4.20 Évolution des VKT offerts par secteur	77
Figure 4.21 Comparatif de l'évolution de la densité des VKT offerts par rapport à la population	78
Figure 4.22 Comparatif de l'évolution de la longueur du réseau par rapport à la population	79
Figure 4.23 Exemple d'une fiche pour un secteur - réseau Canvec - statistiques	80
Figure 4.24 Exemple d'une fiche pour un secteur - réseau Canvec.....	81
Figure 4.25 Distribution des VKT consommés par personne	82
Figure 4.26 Répartition des VKT consommés par personne en 2016.....	83
Figure 4.28 Évolution des VKT consommés entre 2011 et 2016	85

Figure 4.29 Évolution des VKT en % entre 2016 et 2011 - Secteurs municipaux	86
Figure 4.30 Évolution des variables de population et part des non-mobiles par SM - 2011 à 2016	87
Figure 4.31 Comparatif de l'évolution des VKT par rapport à l'évolution de la population.....	88
Figure 4.32 Corrélations entre variables du modèle de régression	91
Figure 4.33 Évolution croisée de l'offre et de la demande en transport - SM.....	95
Figure 4.34 Évolution croisée de l'offre et demande en transport - SR	96
Figure 4.35 Évolutions croisées de l'offre et demande en transport par typologie - SR	97
Figure 4.36 Évolutions croisées de l'offre et demande en transport par typologie - SM	99
Figure 4.37 Élasticités entre l'augmentation de la demande de transport et de l'offre routière - découpage SR.....	101
Figure 4.38 Élasticités entre l'augmentation de la demande de transport et de l'offre routière pour un découpage en SM.	102
Figure 4.39 Comparatif de la distribution des élasticités entre SR et SM	103
Figure 4.40 distributions des élasticités par typologie - SM.....	104
Figure 4.41 Diagrammes en boîte - élasticité par type de secteur - SR	106
Figure 4.42 Diagrammes en boîte - élasticité par typologie - SM	106
Figure 4.43 Part de la superficie couverte par type de secteur.....	108
Figure 4.44 Part de la capacité offerte par type de secteur	109
Figure 4.45 Répartitions de la population par type de secteur	110
Figure 4.46 Part des travailleurs à temps plein par type de secteur	111
Figure 4.47 Part des non-mobiles.....	112
Figure 4.48 Parts modales par type de secteur	114
Figure 4.49 Évolutions des parts modales par typologie	116
Figure 4.50 Distance moyenne de déplacement AC par type de secteur	117

Figure 4.51 Nombre de déplacements par motif pour les secteurs concentrés	118
---	-----

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC	Auto conducteur
AP	Auto passager
AQ	Adresse Québec
AU	Autre
CANVEC	Canadian National Vector dataset
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
EOD	Enquête Origine-Destination
IND	Indicateur
Motrem	Modèle de transport urbain de la région de Montréal
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MV	Marche et vélo
OD	Origine-Destination
SM	Secteur municipal
SR	Secteur de recensement
STATCAN	Statistiques Canada
TC	Transport en commun
UVP	Unité de véhicule particulier
VKT	Véhicules-kilomètres totaux

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	détails des variables de l'index d'ewing (2003).....	131
Annexe B	exemple d'une fiche motrem – emplacement.....	132
Annexe C	exemple d'une fiche motrem – positionnement.....	133
Annexe D	exemple d'une fiche motrem - statistiques.....	134
Annexe E	exemple d'une fiche motrem – comparatif du réseau.....	135
Annexe F	exemple détaillé d'une fiche canvec - emplacement.....	136
Annexe G	exemple détaillé d'une fiche canvec – positionnement.....	137
Annexe H	exemple détaillé d'une fiche canvec - statistiques.....	138
Annexe I	exemple détaillé d'une fiche canvec – réseau.....	139
Annexe J	exemple détaillé d'une fiche canvec – nombre de voies.....	140
Annexe K	exemple détaillé d'une fiche canvec – évolution de la longueur du réseau.....	141
Annexe L	exemple détaillé d'une fiche canvec – évolution des vkt vs population.....	142
Annexe M	valeurs de l'indicateur de dispersion par année.....	143
Annexe N	valeurs de l'indicateur de densité par année.....	144
Annexe O	valeurs de l'indicateur de concentration par année.....	145
Annexe P	valeurs de l'indicateur de continuité par année.....	146
Annexe Q	valeurs de l'indicateur de centralité par année.....	147
Annexe R	statistiques par typologie.....	148
Annexe S	variables de démographie par typologie.....	149
Annexe T	indicateur de mobilité par typologie pour ac et ap.....	150
Annexe U	indicateur de mobilité par typologie pour mv et au.....	151

Annexe V indicateurs de mobilité – motifs de déplacement (travail, étude, retour au domicile) par typologie.....	152
Annexe W indicateurs de mobilité – motifs de déplacement (loisir, magasinage, autre) par typologie.....	153
Annexe X parts modales par typologie	154
Annexe Y nombre de déplacements par motif et par typologie.....	155
Annexe Z VKT consommés par personne entre 2001 et 2016	156

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Entre 2006 et 2016, la croissance de la population canadienne a été cinq fois plus rapide en banlieue qu'au centre-ville. Près de 67,5% de la population canadienne habite actuellement en régions permétropolitaines (Gordon et al, 2018). Le navettage en provenance des communautés métropolitaines (CM) est en forte augmentation et engendre, quotidiennement, des pics de déplacements.

Près de 40% de la population de 30 municipalités limitrophes à la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) navette régulièrement vers le centre-ville et plus de 90 000 voyageurs des pourtours de la CMM choisissent de conduire leur automobile pour se déplacer (Observatoire Grand Montréal, 2020). La conséquence directe de ce phénomène est l'augmentation de la congestion et des temps de déplacement. Il est donc pertinent de mieux comprendre et quantifier les interactions entre étalement urbain et besoins en transport pour mieux anticiper la demande future.

1.1 Problématique

La compréhension des interactions entre étalement urbain et offre et demande en transport nécessite de capturer et de caractériser chaque phénomène avant de procéder à une analyse croisée de leurs évolutions.

À cet égard, plusieurs indicateurs d'étalement urbain ont été documentés, mais leur pertinence varie en fonction des besoins et des domaines de recherche des auteurs (Bhatta, 2010). La relation entre l'étalement des territoires et les besoins de déplacements est assez complexe à caractériser. À titre d'exemple, l'ajout ou l'élargissement d'une autoroute peut intuitivement suggérer une baisse de la congestion pour le non spécialiste. Or, des analyses (Galster et al. 2001) montrent que cela induit plutôt une augmentation de la demande de transport sur de plus longues distances qui, au bout de 5 ans, se traduit par des besoins en infrastructures encore plus importants.

1.2 Objectif & hypothèses

L'objectif général de la recherche est de mettre en perspective la dynamique de l'étalement urbain et de l'offre et demande en transport. Comprendre les interactions et corrélations entre les indicateurs caractérisant ces trois éléments permettra de mieux anticiper les besoins en transport

de la population et de cibler les politiques permettant de soutenir le développement durable des villes et régions métropolitaines. La région de Montréal est utilisée comme cas d'étude.

Pour réussir cette mise en perspective, ce projet de recherche vise l'atteinte de quatre objectifs spécifiques :

- Quantifier l'étalement urbain à l'aide d'indicateurs

Une revue de littérature visant à identifier les indicateurs d'étalement urbain permettra de les catégoriser. Des indicateurs seront retenus et calculés en fonction de la disponibilité des données et de la simplicité d'interprétation.

Le calcul permettra de mettre en évidence les régions permétropolitaines présentant des profils de croissance particuliers et de les comparer aux territoires connaissant des transformations plus limitées.

- Quantifier l'évolution de l'offre en transport

L'analyse des attributs du réseau routier permettra d'établir une analyse de l'évolution des données. En analysant l'évolution de l'offre, il sera possible de faire ressortir les changements au niveau des capacités routières offertes pour différents territoires.

- Quantifier l'évolution de la demande en transport

Le résultat d'une affectation descriptive de données d'enquêtes Origine-Destination (OD) sur le découpage en zones du territoire permettra de ressortir l'évolution des véhicules-kilomètres totaux consommés (VKT). La demande en transport et son évolution temporelle seront ainsi quantifiées pour chacun des territoires ayant connu ou non des transformations.

- Analyse croisée

L'évolution de l'offre en transport et l'évolution de l'étalement urbain du territoire sont par la suite mises en perspective avec l'évolution de la demande en transport.

Cela permet d'évaluer les impacts de l'étalement urbain et de l'offre sur la demande en transport tout en observant les interactions entre étalement urbain et évolution de l'offre en transport.

La structure du mémoire sera donc organisée autour de trois grandes sphères : étalement urbain, offre en transport et demande en transport. Une revue de littérature sera d'abord présentée pour faire état des connaissances. Des indicateurs pour chacune des sphères à l'étude seront calculés par

la suite pour permettre de caractériser l'évolution temporelle du territoire. Finalement, une analyse d'élasticité permettra de clarifier l'interaction entre étalement urbain, offre en transport et demande en transport.

La Figure 1.1 reprend le schéma de réflexion général.

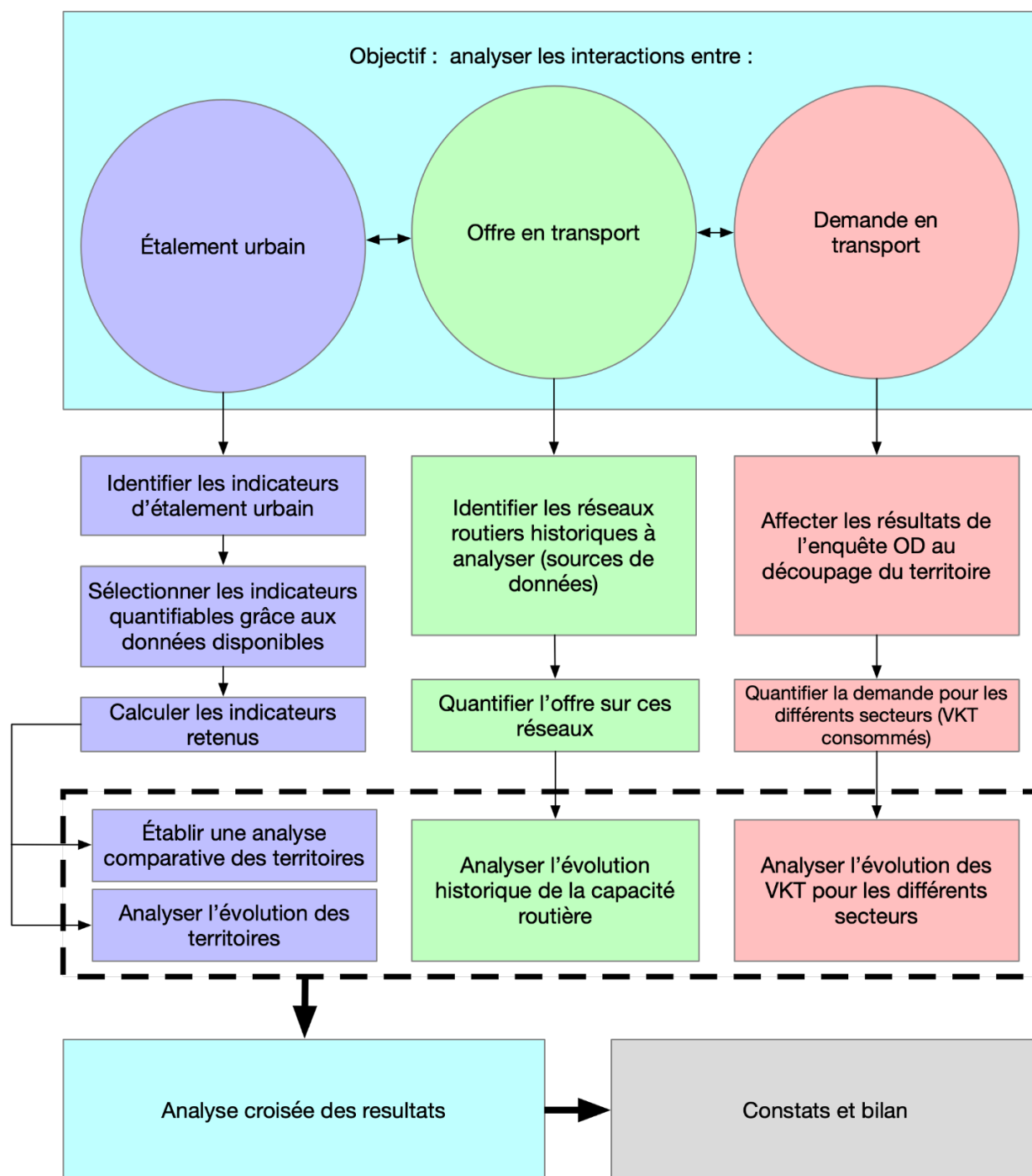


Figure 1.1 Méthodologie générale

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'étalement urbain est un concept qui est largement documenté. Plusieurs études font état d'indicateurs développés pour quantifier ce phénomène. Le constat qui en ressort selon Bhatta (2010) est que ces indicateurs sont développés en fonction des besoins d'une étude en particulier et ne permettent pas de caractériser de manière objective les zones sujettes à étalement. Un deuxième constat est qu'une grande partie de ces indicateurs sont développés et calculés pour de grands territoires, l'objectif des auteurs étant généralement de comparer de grandes régions métropolitaines entre elles (villes, voire des états).

Il est également intéressant de constater que dans la grande majorité des revues traitant de l'étalement urbain, le calcul se fait de manière "ponctuelle" : on brosse un constat d'étalement urbain sur la base d'observations et données d'un relevé temporel fixe. En d'autres termes, on cherche à démontrer qu'un territoire présente plus d'étalement urbain qu'un autre, et au niveau temporel on analyse le plus souvent la modification apportée à un indicateur donné sans proposer un profil de croissance du territoire.

Cette revue de littérature fera d'abord état des indicateurs documentés. Ensuite, la question des interactions entre étalement urbain et offre et demande en transport sera abordée grâce aux revues traitant de la modélisation des impacts de l'utilisation de sol et de l'augmentation de capacité routière sur la demande de transport.

2.1 Étalement urbain

Cette section liste les divers indicateurs d'étalement urbain documentés ainsi que le type de données utilisées; une comparaison des similarités entre indicateurs est proposée à la fin de cette section.

2.1.1 Prolifération urbaine pondérée

Pour Jaeger et Schwick (2014), l'étalement urbain est un phénomène qui peut être perçu visuellement dans le paysage. Il se traduit lorsqu'une part faible de la population consomme un espace au sol élevé. Plus la surface bâtie est étendue et dispersée, et plus la consommation de terres par habitant ou par emploi est élevée (intensité d'utilisation plus faible dans la zone bâtie); cela implique un degré d'étalement urbain plus élevé. L'indicateur développé ici est l'indicateur de

"Prolifération urbaine pondérée". C'est un indicateur qui combine trois mesures développées par Jaeger et al. (2010) :

1. L'éparpillement des surfaces bâties est qualifié de dispersion (DIS). L'unité DIS correspond aux unités de perméation par m² de surface bâtie [UPU/m²]. L'idée principale est que l'éparpillement des bâtiments augmente lorsque la dispersion des surfaces bâties est forte. Ce paramètre recourt aux distances comprises entre tous les points qui se situent à l'intérieur des zones bâties (la moyenne des distances de toutes les paires de points possibles est ensuite calculée (Jaeger et al. 2010b). Plus les points sont éloignés les uns des autres, plus ils contribuent à la dispersion. Un outil a été développé pour réussir ce calcul soit le « URban Sprawl MEtrics Calculation (URSMEC) tool ».
2. La perméation urbaine (PU) : est exprimée en unités de perméation urbaine (UPU) par m² de paysage [UPU/m²]. La PU mesure non seulement la taille de la surface bâtie, mais aussi son degré de dispersion.

$$PU = DIS \times \frac{\text{Surface batie}}{\text{aire de la région}}$$

3. Occupation du territoire (OT): Plus la surface bâtie occupée par habitant ou par emploi est faible, meilleure est l'utilisation de la surface. L'occupation du territoire est mesurée en m² de surface bâtie par habitant ou par emploi [m²/(Habitant+Emploi)].

$$OT = \frac{\text{Surface bâtie}}{\text{Nombre}_{\text{batiments}} + \text{Nombre}_{\text{emplois}}}$$

Les valeurs de OT et DIS sont par la suite pondérées grâce à des fonctions développées dans l'outil URSMEC (p1 et p2). L'indicateur final prend pour forme :

$$\text{Indicateur}_{\text{PUP}} = PU \times p1(DIS) \times p2(OT)$$

Le détail des fonctions de pondération tel que développées par Jaeger et Schwick (2014) ont pour forme :

- $p1(DIS) = 0.5 + \frac{e^{0.294432 \times DIS - 12.955}}{1 + e^{0.294432 \times DIS - 12.955}}$
- $p2(OT) = \frac{e^{4.159 - 0.000613125 \times OT}}{1 + e^{4.159 - 0.000613125 \times OT}}$

En appliquant cet indicateur au territoire suisse et en utilisant des données topographiques vectorielles pour repérer les zones bâties, Jaeger et Schwick (2014) ont pu quantifier l'étalement urbain pour quatre périodes données.

Cette approche permet de comparer à la fois des territoires entre eux et leur évolution dans le temps. L'accessibilité et la disponibilité des outils de calcul développés permettront donc d'appliquer ce même calcul au territoire montréalais à condition que les données disponibles le permettent.

2.1.2 Indicateurs de Frenkel et Orenstein (2011)

Pour Frenkel et Orenstein (2011), l'étalement urbain est à la fois un modèle à un moment donné et un processus de changement dans le temps. L'étalement est défini comme un état relatif, justifiant des comparaisons et des analyses multi temporelles. Il est défini par de multiples caractéristiques spatiales quantitatives dont les valeurs ne conduisent pas nécessairement à des conclusions similaires; il se peut même que les conclusions se contredisent en fonction de l'indicateur utilisé.

Une comparaison d'indicateurs a été réalisée et quatre ont été retenus par les auteurs pour caractériser l'étalement urbain. Le choix s'est essentiellement porté sur leur facilité d'interprétation et la disponibilité des données :

1. Densité brute : il s'agit simplement de la densité de population dans un secteur donné :

$$D_i = \frac{\text{Nombre d'habitants}}{\text{Superficie de la zone}} \left(\frac{\text{hab}}{\text{km}^2} \right)$$

Avec:

- i : Zone d'intérêt

2. « Shape index » (SH) ou indicateur de forme : Cet indicateur s'intéresse à la forme des zones construites en comparant le périmètre et la surface des zones construites grâce à la formule suivante :

$$SH_i = \frac{L_i}{2\sqrt{\pi A_i}}$$

Avec:

- i : Zone d'intérêt

- L est le périmètre de la zone construite
 - A est sa surface.
3. « Leap Frog index » (LFI) ou indicateur de continuité qui mesure l'effet d'éparpillement des zones construites:

$$LFI_{gi} = \frac{A_{out}^i}{UA_i}$$

Avec :

- i : Zone d'intérêt
 - A_{out} est la zone non construite de l'unité d'analyse.
 - UA est la surface totale de l'unité analysée.
4. « Mean Patch Size » (MPS) qui mesure la fragmentation du territoire construit :

$$MPS_{ij} = \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{n_{ij}}$$

Avec :

- i : Zone d'intérêt
- n : nombre d'utilisations de sol distinctes
- a_{ij} : surface occupée par l'utilisation de sol j dans le territoire i
- n_{ij} est le nombre de polygones d'utilisation de sol "j" à l'intérieur du territoire i. avec j = 1 à n couvrant l'ensemble des types d'utilisation de sol.

Un exemple de calcul s'est fait pour la ville de Carmiel en Israël. Il a été réalisé en utilisant principalement des cartes vectorielles de la zone combinées à des photos satellites et données de recensement.

Le fait intéressant ici est d'avoir pu utiliser ces données sur deux années pour constater le changement du degré d'étalement urbain. Les indicateurs ont également permis aux auteurs d'attribuer pour un même territoire l'étiquette "compact" ou "étalé" pour chaque indicateur. Il en

ressort donc que l'interprétation pour un même territoire peut être différente en fonction de l'indicateur analysé et du seuil retenu pour le classer.

2.1.3 Concept de dispersion

Bertaud et Malpezzi (2003), considèrent l'étalement urbain à travers le concept de dispersion.

Pour le quantifier, ils comparent l'état de dispersion de la population et des constructions associées à une situation idéale théorique, où toute la population et les constructions seraient réparties de manière uniforme autour d'un noyau (centre-ville par exemple).

La formule de calcul est :

$$\rho = \frac{\sum_i d_i w_i}{C}$$

Où :

- ρ est l'indice de dispersion pour toute la région,
- d_i est la distance entre le i ème tronçon et le centre-ville,
- w_i est la part que représente la population du secteur
- C : calcul similaire pour une ville cylindrique de population et de surface bâtie équivalente.

Cet indicateur permet de comparer des territoires de la taille d'une ville entre eux. Pour l'exploiter à l'échelle de secteurs, il serait intéressant d'en extraire les coefficients " $d_i w_i$ " et de les injecter dans un vecteur explicatif d'étalement urbain. La méthodologie détaillée d'utilisation de cet indicateur sera abordée dans le chapitre méthodologique.

2.1.4 Indicateur d'accessibilité pondéré

Rauber et Alice. (2017) se sont largement inspirés du modèle gravitationnel : l'étalement du territoire peut être perçu comme le potentiel de la zone étudiée à impacter négativement la ville, ici, en l'occurrence, à contribuer à l'étalement urbain. Une zone est sujette à étalement lorsque la valeur de l'indicateur développé est plus élevée que le reste des zones du même territoire.

La mesure proposée prend la forme :

$$I_{\text{étalement}} = \frac{\sum A_i}{O_{\text{total}} D_{\text{total}}}$$

Avec

$$A_i = \sum_{j=1}^n (d_{ij} O_i D_j)$$

$$O_{\text{total}} D_{\text{total}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n O_i D_j$$

- A_i est la mesure proposée de l'accessibilité pondérée en un point donné
- d_{ij} est la distance entre une origine i et une destination j
- O_i est l'attribut d'origine (nombre d'habitations par exemple)
- D_j est l'attribut de destination (nombre d'emplois par exemple)

L'indicateur a été opérationnalisé sur des données de recensement de la ville de Torres au Brésil. Les paires Origine-Destination ont été recrées en dressant une structure de nœuds représentant le nombre de résidents et le nombre d'emplois. Des scenarios simulant une hypothétique implantation de ces nœuds ont permis de calculer diverses valeurs de cet indicateur. Les auteurs ont pu donc comparer l'impact de différentes distributions des domiciles et des lieux d'emplois sur l'indicateur et donc l'évaluation du phénomène d'étalement urbain.

2.1.5 Indicateurs OCDE

Pour l'OCDE (2018), l'étalement urbain est un modèle de développement urbain caractérisé par une faible densité de population qui peut se manifester de multiples façons. Divers indicateurs ont été développés, mais ils sont tous centrés autour de la densité de population. L'opérationnalisation se fait en divisant le territoire en cellules dont la taille a été fixée à 250 x 250m, on retrouve comme indicateur :

- La densité moyenne de population

- La distribution des densités par rapport à la population totale : part de la population vivant dans des zones où la densité de population est inférieure à un certain seuil (par exemple, 1 500 habitants/km²).
- La distribution des densités par rapport à la superficie totale : part de l'emprise urbaine des zones dont la densité de population est inférieure à un certain seuil (par exemple, 1 500 habitants/km²).
- Variation de la densité démographique urbaine, qui est calculée comme étant le coefficient de variation de la densité de la population.
- Un indicateur de fragmentation : nombre de fragments de tissu urbain par km² de surface bâtie.
- Polycentralité : nombre de poches de forte densité recensées dans une agglomération. Il est calculé en considérant comme "centre" toute zone de plus de 5 km² et dont la densité de population dépasse celle des régions avoisinantes.
- Décentralisation : pourcentage de la population résidant hors des poches de forte densité d'une agglomération.

Le calcul s'est fait pour 29 pays de l'OCDE et pour les années 1990 – 2000 et 2014 en utilisant des données de recensement et des délimitations historiques (vectorielles) des territoires. Cela a permis de proposer un constat comparatif de l'état de l'étalement urbain des pays analysés.

L'inconvénient principal de cette méthode réside dans les ressources opérationnelles nécessaires aux calculs requis et au fait qu'elle s'applique à de grands territoires où une variation de population a un impact significatif sur la valeur des indicateurs. Ces indicateurs semblent puiser leur inspiration dans ceux développés par Galster et al. (2001). Ces indicateurs, en raison de leurs besoins en données et leurs méthodes d'interprétation se prêtent mieux au découpage du territoire analysé.

2.1.6 Indicateurs de Galster et al. (2001)

Galster et al. (2001) ont utilisé une combinaison de huit indicateurs d'étalement urbain axés sur les concepts de densité, de mixité d'usage et de schémas d'utilisation du sol. Ils sont tous calculés en

divisant le territoire en cellules de 1 x 1 km ou de 500 x 500 m, dans cette section, sauf référence contraire, une cellule est considérée d'1 km² :

- Densité : la moyenne du nombre de bâtiments dans une cellule appartenant au territoire analysé.
- Continuité : la mesure selon laquelle les terrains aménageables ont été construits (seuil de densité) de façon ininterrompue (% de cellules de 500 x 500 m contenant au moins 10 bâtiments.)
- Concentration : le degré auquel le développement se situe de manière ininterrompue dans relativement peu de kilomètres carrés :

$$I_{concentration} = \frac{ecart\ type\ (Nbat_i)}{moyenne(Nbat_i)}$$

Avec :

$Nbat_i$ = nombre de batiments dans une cellule i

- Clustering : le degré selon lequel le développement a été étroitement lié pour minimiser la quantité de terrain dans chaque kilomètre carré de terrain aménageable occupé par des usages résidentiels ou non résidentiels; il est opérationnalisé en calculant la moyenne des écarts types de la densité d'une utilisation du sol (habitations par exemple) à l'intérieur d'une cellule par rapport aux 4 cellules avoisinantes et pondéré par la densité moyenne de l'utilisation de sol :

$$I_{clustering} = \frac{Moyenne(ecart_{type_4}(Dens_{bat_i}))}{Moyenne(Dens_{bat_i})}$$

Avec :

$Dens_{bat_i}$ est la densité de bâtiment d'une cellule i

$ecart_{type_4}(Dens_{bat_i})$ = écart type de la densité de bâtiments pour une cellule i par rapport aux quatre avoisinante

- Centralité : le degré selon lequel le développement résidentiel est situé à proximité du centre-ville :

$$I_{centralité} = \frac{\sqrt{Surface\ du\ secteur} \times \sum (Nb_{batiments} \times distance\ au\ centre - ville)}{\sum distances\ au\ centre - ville}$$

- Nucléarité : la mesure selon laquelle une zone urbaine se caractérise par un schéma de développement mononucléaire, il est opérationnalisé en calculant le nombre de noyaux grâce aux cinq étapes ci-dessous :
 1. Identifier la densité la plus élevée (en termes d'unités de logement) par cellule = nœud principal
 2. Ajouter toutes les grilles adjacentes qui se trouvent à moins d'un écart type de la densité de cette grille de densité la plus élevée; inclure également les nœuds adjacents aux nœuds ajoutés, à condition qu'ils se trouvent à un écart type de la grille de densité la plus élevée. Le résultat est le nœud central, C.
 3. Recalculer la densité du noyau C nouvellement combiné.
 4. Considérer toutes les autres cellules dans le secteur et qui sont à moins d'un écart type de la densité recalculée (par #3) comme des noyaux séparés, n, à condition qu'ils ne soient pas immédiatement adjacents à un noyau existant.
 5. Ajoutez au noyau toutes les cellules adjacentes à tout noyau identifié au #4 et qui se trouvent à moins d'un écart type du noyau C.
- Mixité d'usages : le degré selon lequel deux utilisations différentes du sol existent dans la même petite zone, ils utilisent pour cela l'index d'exposition de Massey et Denton's (1988) qu'ils représentent comme étant la part de la densité d'une utilisation de sol particulière (par exemple, des unités de logement) dans une autre utilisation de sol (cellule à forte densité de bâtiments de type commercial).
- Proximité : le degré selon lequel les différentes utilisations de sol sont proches les unes des autres dans le territoire, l'opérationnalisation a été effectuée comme suit :
 1. Calculer la distance moyenne pondérée dans un secteur entre un usage du sol donné i et toutes les observations d'un autre usage j (y compris la possibilité que i = j) : Prendre chaque distance entre le centroïde d'une cellule (m) et le centroïde d'une cellule (k) et la pondérer par la proportion de l'utilisation du sol d'intérêt j dans la cellule cible (k).

2. Répéter la procédure pour toute cellule du territoire.
3. Pondérer la moyenne des distances obtenues par la proportion de la part d'utilisation du sol i représentée dans la cellule m .
4. Prendre la moyenne de #3 pour toutes les utilisations du sol.

Galster et al. (2001) ont calculé une partie de ces indicateurs pour 13 villes aux États-Unis en utilisant des données de recensement et d'implantation de constructions résidentielles.

L'opérationnalisation complète de leurs indicateurs n'étant pas réalisable grâce aux besoins en données pour certains calculs (désignation complète de chacun des bâtiments), ils se sont limités aux calculs d'indicateurs de densité, concentration, clustering, centralité, nucléarité et proximité. Une analyse de corrélation a permis de démontrer que trois paires d'indicateurs ne sont pas significativement indépendantes : clustering vs concentration, proximité vs concentration puis centralité vs clustering. Vu les besoins en données et en ressources pour le calcul du clustering et de la proximité, il sera plus efficace pour cette recherche de les écarter au bénéfice des indicateurs de concentration et centralité.

2.1.7 Indicateurs d'Ewing, Pendall et Chen (2003)

Pour Ewing et al (2003), l'étalement est quantifié grâce un index qui est la somme non pondérée de quatre facteurs principaux composés de 22 variables; Le détail des 22 variables avec leur signification est repris en annexe A pour ne pas alourdir cette section.

Les quatre facteurs utilisés sont:

- Facteur de densité.
- Mixité d'usages.
- Centralité.
- Accessibilité au réseau routier.

Les diverses variables considérées pour chacun des facteurs sont extraites grâce à une analyse en composantes principales; celles retenues sont sommées entre elles pour constituer un facteur. L'index global est ensuite la somme des quatre facteurs calculés.

Ce calcul a été réalisé sur 83 régions métropolitaines des États-Unis. Les sources de données n'étant pas clairement explicitées, on suppose - vu la forme des variables - que des données historiques de recensement et des cartes d'utilisation des sols et du réseau routier ont été considérées pour ce calcul.

Les résultats des calculs, combinés à une analyse de la demande (véhicules-kilomètres totaux par personne, temps de marche, heures passées en transport en commun...) ont permis de démontrer que les zones étalées ont une utilisation des transports en commun bien inférieure à celle des zones compactes.

2.2 Offre routière en transport

La revue de littérature traitant de l'aspect offre en transport est étroitement liée à la demande induite; l'objectif de plusieurs auteurs derrière cette caractérisation est d'étudier l'impact de l'évolution de l'offre en transport sur la demande de transport.

Gorham (2009) définit la demande induite comme la demande supplémentaire résultant de l'amélioration des conditions de déplacements. Pour cette recherche l'amélioration des conditions de déplacement est représentée par l'évolution de capacité routière offerte.

Pour caractériser la capacité routière, Ewing et al. (2014) ont utilisé la longueur du réseau autoroutier multiplié par le nombre de voies comme première variable, puis la longueur du réseau routier (hors autoroute) comme deuxième variable.

Le calcul s'est fait pour 315 zones urbanisées des États-Unis. Une des conclusions est que les zones offrant une grande capacité sont peu denses et leurs habitants sont davantage consommateurs de VKT.

Volker et al. (2020) ont également considéré la longueur du réseau supérieur (autoroute – route nationale) multipliée par le nombre de voies comme indicateur de la capacité offerte. En analysant l'impact des évolutions temporelles de ces variables sur la demande de transport (VKT), ils ont pu dresser un bilan des divergences entre les politiques justifiant l'expansion de la capacité routière et la consommation de VKT réelle.

Pour Ryosuke et Axhausen (2018), l'offre est également calculée grâce aux voies-kilomètres du réseau routier et du réseau ferroviaire; le calcul a pu se faire sur 30 années pour la ville de Tokyo.

L'impact de l'étude de la transformation de l'offre combinée à des variables d'âge d'individu a permis d'expliquer la variabilité des temps de déplacements.

2.3 Demande en transport

L'analyse de la demande en transport pour cette recherche nécessite de s'intéresser à deux volets permettant de mettre en perspective les effets de l'étalement urbain et de l'offre en transport sur la demande.

Pour cela on s'intéressera tout d'abord à la relation entre la demande en transport et les variables sociodémographiques (densité de population par exemple) combinées aux variables décrivant les schémas d'utilisation de sol.

On mettra par la suite en lumière les travaux traitant de la demande induite par l'augmentation de la capacité routière.

2.3.1 Impacts de la sociodémographie et de l'utilisation du sol

Pour ce troisième volet, on s'intéresse aux travaux traitant de l'impact de variables sociodémographiques et d'utilisation de sol sur la demande en transport.

Singh et al (2018), à travers une analyse holistique de facteurs socioéconomiques, démographiques et d'environnement bâti, ont pu expliquer 56% de la variabilité des VKT consommés par les ménages new-yorkais. Un modèle d'équations simultanées appliqué aux données de recensement et aux données d'enquêtes Origine-Destination (3000 ménages) a permis d'obtenir les résultats suivants :

- 33% de variabilité est expliquée par des variables sociodémographiques des ménages (structure familiale, cohorte d'âges, revenus...);
- 12% de variabilité est liée à la densité résidentielle.
- 11% de variabilité est expliquée par des effets d'autosélection tel le type de logement (condo, maison unifamiliale, etc....).

Il en ressort donc que la densité résidentielle, qui est étroitement liée à la densité de population, est une variable qui à elle seule (12%) explique une partie importante de la variabilité des VKT.

Dans une autre publication, Brownstone (2008) soulève l'importance de considérer le biais d'autosélection lors de l'analyse des corrélations entre VKT consommés et variables sociodémographiques. Il confirme à travers une analyse de la littérature qu'il existe un lien statistiquement significatif entre les VKT, les variables d'environnement bâti et la densité.

Ewing et Cervero (2001) ont réalisé une synthèse de plus de 50 publications traitant de la relation entre l'environnement bâti et la demande en transport. Il en ressort que plusieurs articles expliquent la variabilité de la demande par des élasticités entre les VKT et les variables d'environnement bâti et d'utilisation du sol (telles des mesures d'entropie, de mixité d'usage, de densité résidentielle, etc..). On y retrouve plusieurs références aux 3D (densité, diversité, design) de Cervero & Kockelman (1997). Cela conforte donc le choix de combiner des indicateurs d'étalement urbains, censés synthétiser l'environnement bâti et l'utilisation de sol, à la demande en transport exprimée essentiellement à travers les VKT consommés.

2.3.2 Impact de l'augmentation de capacité routière

Le quatrième volet de cette revue de littérature s'intéresse aux études des impacts que peut avoir l'augmentation de l'offre en transport sur la demande de transport.

À cet égard, Ewing (2014) a développé un ensemble d'équations structurelles visant à établir l'impact de la variabilité de la capacité routière offerte sur les véhicules-kilomètres totaux (VKT) parcourus par les résidents d'une région. L'effet longitudinal de la transformation de l'offre a été exprimé en pourcentage d'évolution de chacune des variables du modèle.

Pour Axhausen (2018), Melo et al. (2012), Noland (2001) et Cervero (2002), des modèles de régression linéaires ont permis d'expliquer l'impact relatif de la variation de l'offre routière sur la demande induite.

Dans une étude récente, Litman (2021) s'est intéressé aux méthodes d'évaluation de la demande induite par l'augmentation de capacité routière. Grâce à une revue de littérature exhaustive, il a pu démontrer que la congestion tend à maintenir un équilibre; l'augmentation de capacité routière génère, sur le court terme, une augmentation de transfert modal vers l'automobile. Sur le long terme, cette demande induite finit par augmenter les VKT totaux.

Une approche utilisant des modèles d'élasticité a permis à Volker (2020) de démontrer que l'analyse dite environnementale (basée sur des projections d'expansion routière/ documents

gouvernementaux) ne permet pas de prédire et d'estimer de manière convenable les VKT induits. Il suggère d'utiliser des calculs d'élasticité à cette fin.

He, N., & Zhao, S (2015) ont exploré divers modèles également pour conclure qu'un modèle d'élasticité, à trois niveaux, s'adaptait le mieux à expliquer la variabilité des VKT.

Ces études restent néanmoins très tributaires de la disponibilité, du type et de la qualité des données utilisées. On pourrait supposer que la différence entre les zones et territoires étudiés contribue au choix de variables et modèles explicatifs : un modèle calibré à un territoire aux États-Unis risque de ne pas être représentatif si la même étude est appliquée à un territoire en Chine par exemple.

2.4 Synthèse

La première section de cette revue de littérature permet de synthétiser des définitions et méthodes de calcul caractérisant le phénomène d'étalement urbain. Les indicateurs et définitions s'entrecroisent, mais aucun ne caractérise l'évolution temporelle de ce phénomène : les indicateurs sont calculés pour différentes périodes, mais il n'existe pas d'indicateur ou de caractérisation qui permet d'établir des profils de croissance distincts de manière quantitative.

Le projet en cours visera donc à utiliser cet ensemble de connaissances pour développer une typologie permettant de caractériser l'évolution de l'étalement urbain et d'identifier les transformations de territoire. En appliquant une sélection de ces indicateurs à un découpage (temporellement immuable) du territoire montréalais, il sera possible d'y traiter l'évolution du phénomène.

Il ressort de la deuxième, troisième et quatrième section que la demande induite est essentiellement exprimée en VKT et que la caractérisation de l'offre se fait principalement en analysant l'expansion du réseau routier.

L'apport de ce projet de recherche consistera donc à intégrer la variante "étalement urbain" aux constats documentés. Cela permettra non seulement de déceler l'impact de l'étalement urbain sur la variabilité de la demande (VKT), mais également de clarifier la relation entre la variation de capacité routière et les tendances d'étalement urbain.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Le chapitre précédent a permis de mettre en lumière les différentes approches utilisées pour caractériser chacune des sphères d'intérêt : étalement urbain, offre en transport et demande en transport.

L'objectif de ce chapitre est d'explicitier les différentes méthodes de calculs appliquées aux indicateurs retenus, les bases de données utilisées, ainsi que les statistiques descriptives qui en découlent.

L'objectif initial était d'établir ces calculs pour les années 2001 – 2006 - 2011 et 2016. Ce pas temporel permet d'utiliser à la fois les données des recensements canadiens et les sources de données connexes calées sur les enquêtes Origine-Destination (OD) montréalaises. Mais des enjeux liés à la disponibilité des sources de données empêchent l'atteinte de cet objectif pour les trois sphères étudiées. Le détail des enjeux rencontrés et les données spécifiques à chaque calcul seront abordés dans ce chapitre.

3.1 Découpage du territoire

Avant de se consacrer au calcul des différents indicateurs, il est essentiel d'établir un découpage du territoire qui répond à deux contraintes essentielles :

1. Rester fixe pour toutes les années d'étude;
2. Pouvoir recevoir une affectation des variables à calculer (densité de population, surface des bâtiments...).

L'objectif premier de cette démarche est d'obtenir un découpage de l'ensemble du territoire de l'enquête OD, qui soit à la fois fixe et le plus fin possible.

La réflexion s'est tournée vers les secteurs de recensement (SR) vu que le niveau de résolution qui est encore plus fin, celui des aires de diffusion, risque d'entraîner des biais au niveau de l'interprétation des résultats de calculs engendrés par l'effet de frontières. L'une des principales contraintes liées au choix des SR réside dans le fait qu'au sein même du territoire de l'enquête, les limites des secteurs peuvent se transformer à travers les années.

L'approche retenue était donc de considérer un découpage hybride entre secteur de recensement et subdivision de recensement (SDR), dont les limites restent fixes pendant la période étudiée.

Deux sources de données ont été considérées :

1. Fichier de limites du recensement canadien de Statistiques Canada :
 - a. Shapefiles du découpage en SR de la RMR.
 - b. Shapefiles du découpage SDR du territoire du grand Montréal.
 - c. Données de recensement de la population au niveau des SR et SDR pour tout le territoire. Les variables de population pour les années 2001-2006-2011 et 2016 ont été extraites.
2. Limites du territoire de l'enquête OD 2018 de l'Autorité régionale de transport métropolitain (ARTM) :
 - a. Shapefiles du territoire de l'enquête OD.

La particularité des SR ayant changé de forme est qu'ils gardent une partie de l'identifiant unique de l'année précédente. Ainsi, le secteur ayant pour identifiant 4620100 en 2006 a été découpé en deux secteurs ayant pour nouvel identifiant en 2011 : 4620100.01 et 4620100.02.

L'agrégation des deux secteurs permet donc de recréer pour 2011 un secteur ayant les mêmes limites que celui des années précédentes.

Un algorithme agrégeant les secteurs lorsque des décimales sont présentes à une année N et pas en N-1 a permis de recréer un même découpage des secteurs entre 2001 et 2016.

Néanmoins cette approche est valable quand, pour l'année N-1, un secteur est déjà considéré comme secteur de recensement, ce qui n'est pas le cas pour l'ensemble du territoire de l'enquête OD.

La suite de l'approche pour les secteurs non joints a donc été de joindre géographiquement les territoires restants avec leurs correspondants en subdivisions de recensement.

Le résultat final, illustré en Figure 3.1, est un découpage en 690 zones dont 625 sont des SR et 65 des SDR

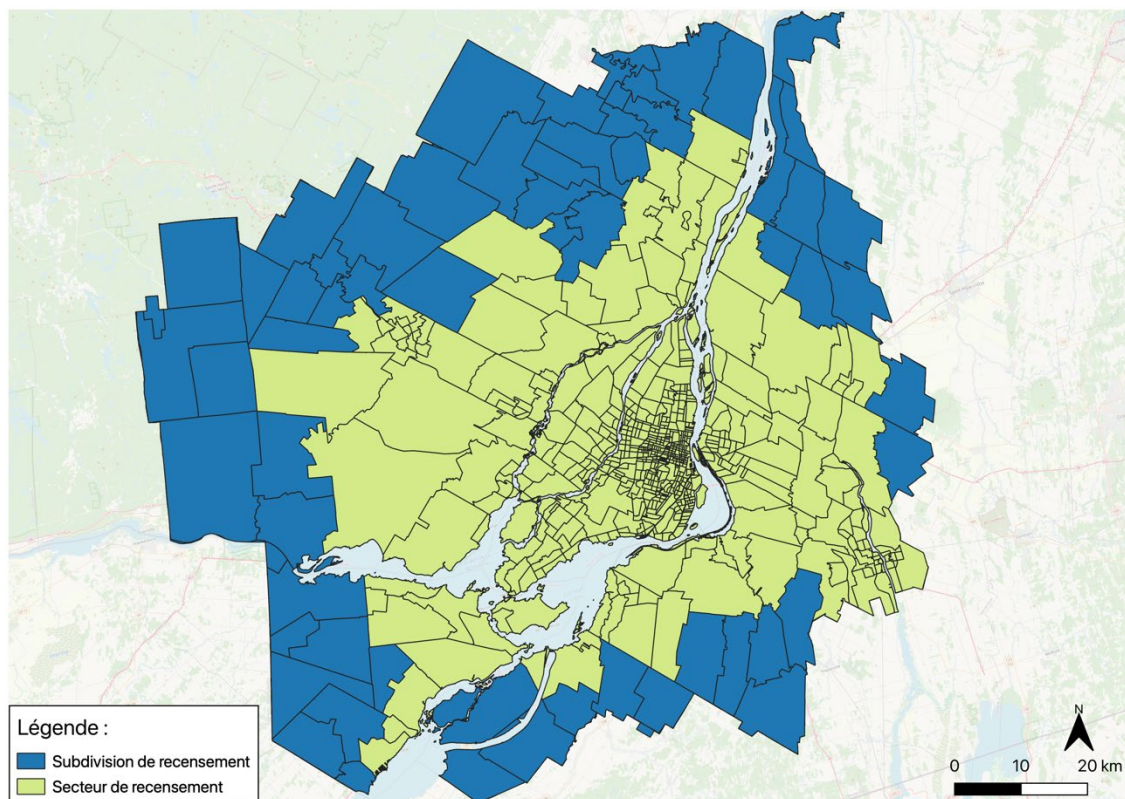


Figure 3.1 Découpages du territoire

Les algorithmes développés font en sorte de garder une trace des transformations effectuées; cela permet essentiellement d'affecter les données d'autres sources de données à ce découpage.

Le Tableau 3.1 représente un exemple appliqué à l'agrégation des données de population :

Tableau 3.1 Trace de la construction du découpage unique du territoire :

Identifiant unique du secteur	Trace des identifiants en 2011	Trace du calcul de la population en 2011	Population en 2011	Trace des identifiants en 2006	Trace du calcul de la population en 2006	Population en 2006
4620100	4620100.02 & 4620100.01	3486 + 4065	7551	4620100	7618	7618
4620064	4620064	1968	1968	4620064	1175	1175
4620065	4620065.01 & 4620065.02	6762 + 2580	9342	4620065.01 & 4620065.02	6171 + 2581	8752
4620066	4620066.01 & 4620066.02	2778 + 1979	4757	4620066.01 & 4620066.02	2579 + 2017	4596

La première colonne représente l'identifiant qui est unique à chaque zone du découpage, les colonnes traces des identifiants reprennent l'identifiant tel que documenté dans la base de données source. Dans le Tableau 3.1 par exemple, la colonne trace reprend les identifiants des secteurs tels que documentés dans la base de données de recensement de STATCAN. La colonne trace du calcul de la population reprend la formule utilisée pour calculer la population totale et le résultat est affiché dans la colonne population.

3.2 Indicateurs d'étalement urbain

Le choix des indicateurs à calculer s'est fait en essayant de couvrir la majeure partie des dimensions et définitions retrouvées en littérature. La disponibilité des données et l'aisance de calcul ont contribué également à délimiter le choix d'indicateurs.

Lorsque deux indicateurs différents se rejoignent sur l'aspect à caractériser, indicateur de centralité de Galster et al (2001) et centralité de Ewing et Pendall (2003) par exemple, le choix se porte sur l'indicateur nécessitant le moins de ressources en données et dont la compréhension est plus intuitive. Pour cet exemple, l'indicateur de Galster est retenu puisqu'il nécessite un calcul (après préparation des données), contrairement à celui d'Ewing qui nécessite de calculer six variables et d'en extraire une grâce à une analyse en composantes principales.

L'ensemble des indicateurs retenus visent donc à caractériser l'étalement urbain à travers les concepts de :

- Dispersion
- Densité
- Concentration
- Continuité
- Centralité

Les sections qui suivent listent le détail des calculs effectués ainsi que les données utilisées.

3.2.1 Indicateur de dispersion

Pour caractériser la dispersion, l'indicateur de Bertaud et Malpezzi (2003) sera utilisé, et comme énoncé au chapitre 2, le coefficient propre à chaque secteur en est extrait et servira de valeur de dispersion.

La formule de calcul prend donc la forme :

$$I_{dispersion}(SR) = d_{i_{SRc}} \times \frac{Pop(SR)}{Pop_{total}}$$

Avec :

SR = secteur d'intérêt

i_{SR} = centroïde du secteur d'intérêt

$d_{i_{SRc}}$ = distance entre le centroïde du secteur au centre-ville (c), Le centre-ville est défini comme la position de l'hôtel de ville de Montréal

Pop_{SR} est la population du secteur

Pop_{total} est la population totale du territoire

Le choix d'utiliser la position de l'hôtel de ville comme point de référence permet d'avoir une référence commune pour l'ensemble des indicateurs à calculer. Une approche visant à repérer le générateur par secteur empêcherait une analyse de l'ensemble du territoire et de son évolution. La position du "centre-ville" risquerait d'être modifiée au travers des années et ce qui pourrait entraîner des valeurs ne pouvant être comparées pour les années de référence.

Le calcul est effectué en utilisant les données de recensement pour les années de références listées précédemment. L'agrégation des données de population est réalisée grâce à la trace issue de l'algorithme de découpage de territoire.

3.2.2 Indicateur de densité

On utilisera ici la densité telle que définie par Galster et al. (2001). L'avantage de la méthode utilisée est qu'il ne s'agit pas d'un calcul de densité résidentielle classique (contrairement aux indicateurs de Frenkel et de l'OCDE). Le calcul de densité se fait en découpant le territoire en

cellules d'un km²; il permet donc de séparer deux territoires ayant la même surface et le même nombre de bâtiments, mais dont l'implantation est différente.

Les données du rôle foncier (2020) et du cadastre ont été utilisées, il a fallu en extraire :

- Emplacement géométrique des bâtiments (coordonnées x,y) pour affecter chaque bâtiment à son secteur d'appartenance.
- Année de construction du bâtiment, pour reconstruire le paysage bâti aux années cibles.
- Destination principale du bâtiment (CUBF) pour permettre de séparer les bâtiments à vocation résidentielle des bâtiments commerciaux

Des jointures en fonction d'identifiants communs aux trois bases de données ont permis de recréer, pour chaque année de référence, un ensemble de points représentant les bâtiments construits avant la date cible.

Le découpage en grille du territoire s'est fait en considérant les frontières du secteur : si une cellule empiète sur plusieurs secteurs, la part (surface) de chaque cellule est considérée pour pondérer les calculs. L'indicateur se calcule grâce à la formule suivante :

$$Indicateur_{Densité} = moyenne_{secteur} \left(\frac{\text{Nombre de batiments}}{\text{surface de la cellule}} \right)$$

Plus la valeur de cet indicateur est basse et plus l'étalement urbain est important.

3.2.3 Indicateur de concentration

L'OCDE (2018) et Galster (2001). Ont utilisé deux calculs différents pour caractériser cette notion: l'OCDE considère plutôt la densité de population comme donnée d'entrée alors que Galster s'intéresse plutôt à la concentration de bâtiments dans le territoire.

Il a semblé plus approprié ici d'utiliser les variables liées aux bâtiments pour caractériser l'étalement urbain.

Cela s'explique par le fait que l'un des objectifs de cette étude est d'analyser les impacts de l'utilisation de sol sur la demande induite en transport. L'analyse de l'impact de l'évolution de la densité de population sur cette demande est également traitée explicitement, il est donc préférable de ne pas l'inclure implicitement dans le calcul d'un indicateur. L'introduction de variables liées à

la population risquerait donc d'entraîner une corrélation lors de l'analyse de l'impact qu'aurait l'évolution de densité de population sur cette demande.

En utilisant toujours le même découpage en cellules, l'indicateur se calcule grâce à la formule :

$$Indicateur_{Concentration} = \frac{ecart_{type}(Nb_{batiments} \text{ dans une grille de } 1 \times 1 \text{ km}^2 \text{ appartenant au secteur})}{Moyenne (Nb_{batiments} \text{ du secteur})}$$

3.2.4 Indicateur de continuité

Pour caractériser cette notion de continuité ("Leap Frog"), deux mesures sont possibles : l'indicateur de Frenkel et celui de Galster.

Pour Frenkel, l'indicateur nécessite d'avoir l'empreinte au sol des bâtiments et de déterminer le centre-ville de la zone. Vu que le découpage étudié représente des secteurs de recensements, la notion de centre-ville n'est pas pertinente pour chaque secteur.

De plus, la source de données pour récupérer l'empreinte au sol des bâtiments est "Empreinte des bâtiments : surface et périmètre (Microsoft 2019)" qui est une représentation vectorielle des bâtiments issue d'images satellites (télédétection). Le principal enjeu d'utilisation de ces données est de reconstruire l'image historique du territoire avec l'emprise au sol des bâtiments. Malheureusement avec ces données, à chaque mise à jour, l'historique est écrasé et il n'existe plus de visualisations historiques de l'empreinte des bâtiments.

Une tentative a été faite pour croiser les deux bases de données (rôle foncier et données Microsoft). L'idée est d'attribuer l'année de construction à la représentation vectorielle du bâtiment et reconstruire ainsi le paysage des années précédentes.

Cette tentative n'a malheureusement pas abouti, car les bâtiments sont représentés par des points (X-Y) dans les données du rôle foncier. En les projetant sur la couche vectorielle de l'emprise des bâtiments, certains se retrouvent en dehors des limites des bâtiments tandis que d'autres bâtiments reçoivent plusieurs projections (deux années de construction différentes pour un même vecteur).

On s'est donc tourné vers la continuité telle que calculée par Galster, la définition étant la même que celle de Frenkel; le calcul est simplifié en considérant l'équation :

$$I_{continuité} = \frac{Nombre_{grilles} \text{ de } 500 \times 500 \text{ m contenant au moins 10 batiments}}{Nombre_{grilles} \text{ de } 500 \times 500 \text{ m du secteur}} \times 100$$

3.2.5 Indicateur de centralité

La centralité a été abordée par Galster, par Ewing et par l'OCDE. Les deux derniers caractérisent cette centralité du territoire par rapport aux densités de population.

Pour Ewing, le calcul de l'indicateur nécessite de considérer six variables et d'en extraire les plus représentatives grâce à une analyse en composantes principales :

1. Coefficient de variation de la densité de population entre les secteurs de recensement (écart-type divisé par la densité moyenne).
2. Gradient de densité (taux de déclin de la densité de population avec la distance au centre-ville),
3. Pourcentage de la population résidant à moins de 3 km du centre-ville.
4. Pourcentage de la population métropolitaine à plus de 10 km du centre-ville.
5. Pourcentage de la population habitant aux centres ou sous-centres du même secteur.
6. Rapport de la densité des centres de population au sein du même secteur au centre de densité le plus élevé du territoire.

Pour l'OCDE, il s'agirait plutôt du pourcentage de population qui réside en dehors des poches de forte densité. Le seuil de forte densité est défini en observant les distributions de la densité de population du territoire étudié.

On remarque donc que pour ces deux définitions, la densité de population est la principale variable d'intérêt, or comme évoqué précédemment, le but étant de caractériser le territoire urbain, l'indicateur de Galster est encore une fois celui qui se prête le mieux à cet exercice :

$$Indicateur_{Centralité} = \frac{\sqrt{Surface\ du\ SR \times \sum (Nb_{batiments} \times distance_{centre-ville})}}{\sum distances\ au\ centre_ville}$$

3.3 Typologie d'étalement urbain

Une fois l'ensemble de ces indicateurs calculés, l'approche permettant de caractériser l'évolution du territoire consiste en l'affectation de types aux secteurs étudiés.

La particularité de cette typologie est qu'elle ne considère pas uniquement l'état du territoire à une année donnée, mais prend en compte l'ensemble des données sur les 15 années étudiées.

Cela permet donc d'affecter une appartenance pour chaque année d'étude tout en retraçant l'évolution des secteurs à travers les années.

Deux méthodes de classification ont été utilisées : méthode du dendrogramme et méthodes des k-moyennes.

La valeur des indicateurs a été centrée et réduite et la base de données a été transformée afin d'obtenir une observation qui correspond à une année pour les 5 indicateurs. La base de données comporte 2748 observations de 5 variables (indicateurs).

La Figure 3.2 et la Figure 3.3 représentent les résultats d'application des deux méthodes, On remarque que pour la méthode des K-moyennes (Figure 3.2) un aplatissement de la courbe débute à partir de sept clusters. Pour la méthode du dendrogramme (Figure 3.3), on remarque qu'en dessous de la ligne tracée en rouge, la séparation des groupes devient moins représentative des différences de classification (rectangles moins larges). Cette ligne coupe le diagramme en sept points correspondants à sept types distincts. Les deux méthodes permettent donc d'obtenir des résultats comparables et c'est ainsi que le choix de typologie s'est donc porté sur 7 types distincts.

Méthode des k moyennes :

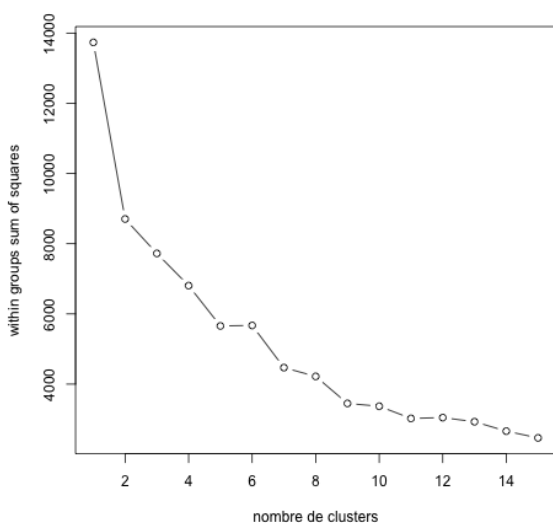


Figure 3.2 Méthode des K-moyennes

Méthode dendrogramme :

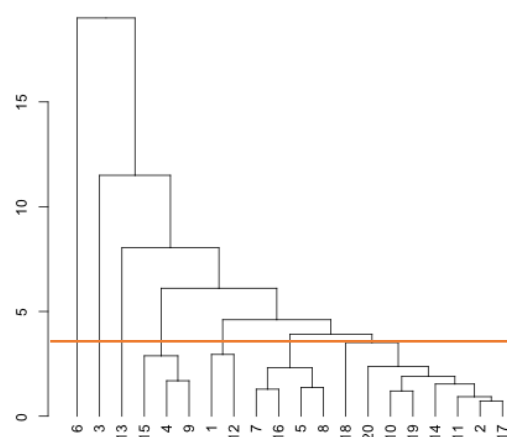


Figure 3.3 Méthode du dendrogramme

En analysant la valeur centrale des indicateurs pour chaque type, il est possible d'y affecter une nomenclature caractérisant son appartenance (voir Tableau 3.2). Les valeurs négatives représentent les valeurs inférieures à la valeur centrale du type considéré.

Tableau 3.2 Valeurs centrales des indicateurs par type

Type	Centralité	Densité	Continuité	Concentration	Dispersion	Nomenclature
1	0,00	-0,93	-1,23	0,64	-0,05	Concentration légère
2	3,51	0,34	-0,30	0,13	0,15	Centralité
3	0,62	-1,20	-1,75	2,53	0,23	Concentration
4	-0,02	1,74	0,74	-0,59	-0,12	Densité
5	0,44	-0,55	-0,85	0,64	3,40	Dispersion
6	-0,21	-0,14	-0,01	-0,22	-0,28	Discontinuité légère
7	-0,40	0,18	0,93	-0,68	-0,28	Discontinuité

Pour faciliter la compréhension des nomenclatures et mieux apprécier les analyses qui suivront, une définition simplifiée (vulgarisée) des types est présentée en Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Définitions simplifiées des types d'étalement urbain

Type	Définition simplifiée
Centralité	Secteurs centraux situés à proximité du centre-ville
Densité	Secteurs denses abritant une forte concentration des habitations sur l'ensemble du territoire
Concentration	Secteurs qui se concentrent localement sur eux-mêmes
Concentration légère	Idem que les secteurs concentrés, mais dans une moindre mesure : l'effet de la concentration baisse sur l'ensemble de la surface
Discontinuité	Secteurs construits avec des concentrations séparées par des zones vacantes (Leap Frog)
Discontinuité légère	Idem que les secteurs discontinus, mais avec moins de zones vacantes dans le territoire
Dispersé	Secteurs avec des constructions éparpillées dans l'espace considéré

3.4 Offre en transport

Pour caractériser l'offre routière, et à la lumière de la revue de littérature précédente, le calcul sera articulé autour de la longueur et du nombre de voies du réseau routier. Cela permettra, grâce à une affectation des capacités aux segments routiers, de calculer la capacité routière totale offerte pour un secteur.

3.4.1 Réseau routier Motrem

Dans un premier temps, le réseau routier utilisé pour les simulations EMME du ministère des Transports du Québec (MTQ) a été exploré. L'avantage de cette approche est que les segments

routiers disposent déjà d'une capacité routière et que les données se présentent en réseau routier distinct pour les années : 2003 – 2006 -2008 – 2011 - 2013 - 2016.

le traitement de cette source de donnée fait ressortir un ensemble d'enjeux complexifiant son exploitation, la section qui suit en fait état :

L'étalement urbain étant caractérisé pour des secteurs dont les limites sont restées fixes à travers les années, la caractérisation de l'offre routière se doit de suivre le même principe. La première étape est donc de reconstituer un réseau routier historique où il est possible de repérer les modifications apportées aux liens.

L'enjeu rencontré ici est que la codification, la géométrie et la typologie des segments ont été modifiées à travers les années : certains segments qui semblent géographiquement correspondre ont des formes, des affectations et des identifiants différents.

La Figure 3.4 illustre un exemple de la comparaison du réseau routier entre 2003 et 2016. les deux segments indiqués par des flèches suggèrent qu'une artère mineure en 2003 s'est transformée en route régionale en 2016 et que sa capacité est passée de 800 à 1400 uvp/h. cela soulève l'interrogation sur la nature de cette transformation, est-ce une différence de codification ou une réelle modification de l'utilisation du segment ?

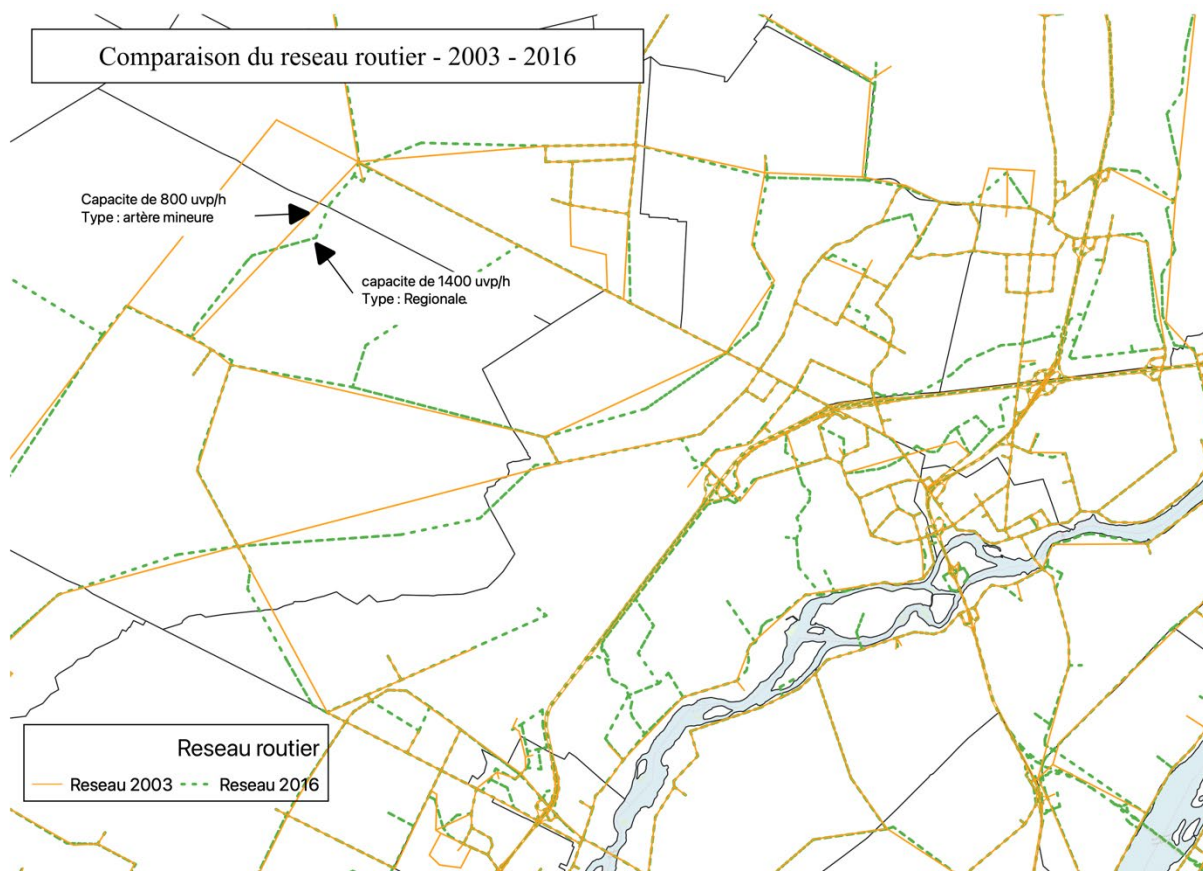


Figure 3.4 Comparaisons des réseaux routiers Motrem 2003 et 2016

Reconstruire l'historique des secteurs et analyser les causes possibles expliquant les différences de capacité observées sur le réseau fusionné devient donc moins intuitif face à un tel enjeu.

L'exercice de comparer deux années de référence, 2003 et 2016, a fait ressortir certaines interrogations, discutées avec le MTQ, qui sont à l'origine des données et qui se sont avérées d'une aide précieuse pour clarifier certains enjeux :

- Les segments aux limites du territoire OD ont une capacité réduite à 300 uvp/h en 2016 et pas en 2003 : il s'agit principalement de connecteurs de centroïdes externes qui doivent être exclus des analyses.
- Des collectrices de 2003 transformées en autoroute en 2016 peuvent à la fois être dues à des modifications de codification ou correspondre à de réelles transformations; une piste pour différencier ces deux situations serait de croiser ces données à celles d'adresse Québec.

- Plusieurs liens ont été subdivisés ou fusionnés, mais les nœuds d'origine et de destination peuvent correspondre si les longueurs de segments n'ont pas été modifiées.
- Les autoroutes denses et normales sont représentées par la codification autoroute en 2016, mais avec des capacités différentes.
- Certaines routes locales en 2016 ont reçu par erreur des capacités de 1800 uvp/h.
- Il est possible d'établir des correspondances entre ces classifications :
 - Artères mineures + majeures de 2003 = artère de 2016
 - Autoroutes normales + denses 2003 = autoroute 2016
 - Breteille autoroutière = breteille 2003
 - La classe breteille urbaine en 2003 a été remplacée par un type qui correspond mieux à l'utilisation des segments en 2016.
- Il faudrait tronquer le réseau de 2003 qui s'étend au-delà des limites du territoire OD pour chercher une correspondance avec celui de 2016.
- Les connecteurs en 2016 peuvent être identifiés lorsque le nœud de départ ou de destination (I ou J) a un identifiant inférieur à 10 000 (classification absente du réseau en 2016).

Une analyse exploratoire de la composition des réseaux distincts a permis de brosser certains constats quant à la composition générale du réseau pour les années 2003 – 2016.

La Figure 3.5 représente un constat, avant jointure, de la composition du réseau pour les deux années 2003 et 2016. Le réseau est présenté avant toute modification de la géométrie et des classes attribuées.

En prenant l'exemple d'artères, on remarque qu'elles sont codées en deux classes distinctes en 2003 (mineure et majeure), alors qu'en 2016 une seule classe représente ce type de route : Artère. Néanmoins on remarque que la longueur cumulée des artères en 2003 (deux premières barres du graphique 2003) dépasse celle de 2016 (première barre du graphique 2016).

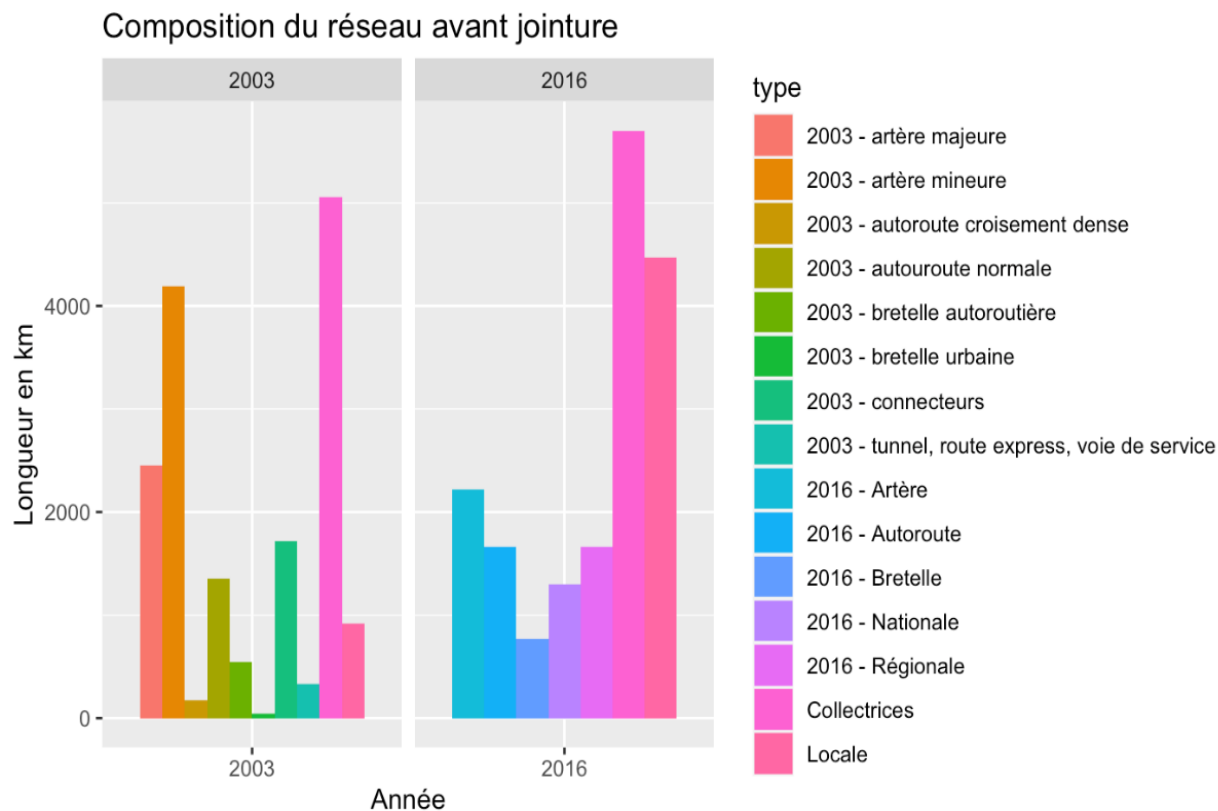


Figure 3.5 Composition du réseau Motrem avant jointure

La Figure 3.6 et la Figure 3.7 représentent respectivement la capacité minimale et maximale observée par type de segment routier (les connecteurs de centroïdes ne sont pas inclus dans cette estimation) pour les données de 2003 et 2016. On constate que l'approche d'affectation des capacités aux segments routiers est différente entre les deux années, avec l'apparition de cas particuliers discutés précédemment (route locale ayant 1800 uvp/h en capacité par exemple).

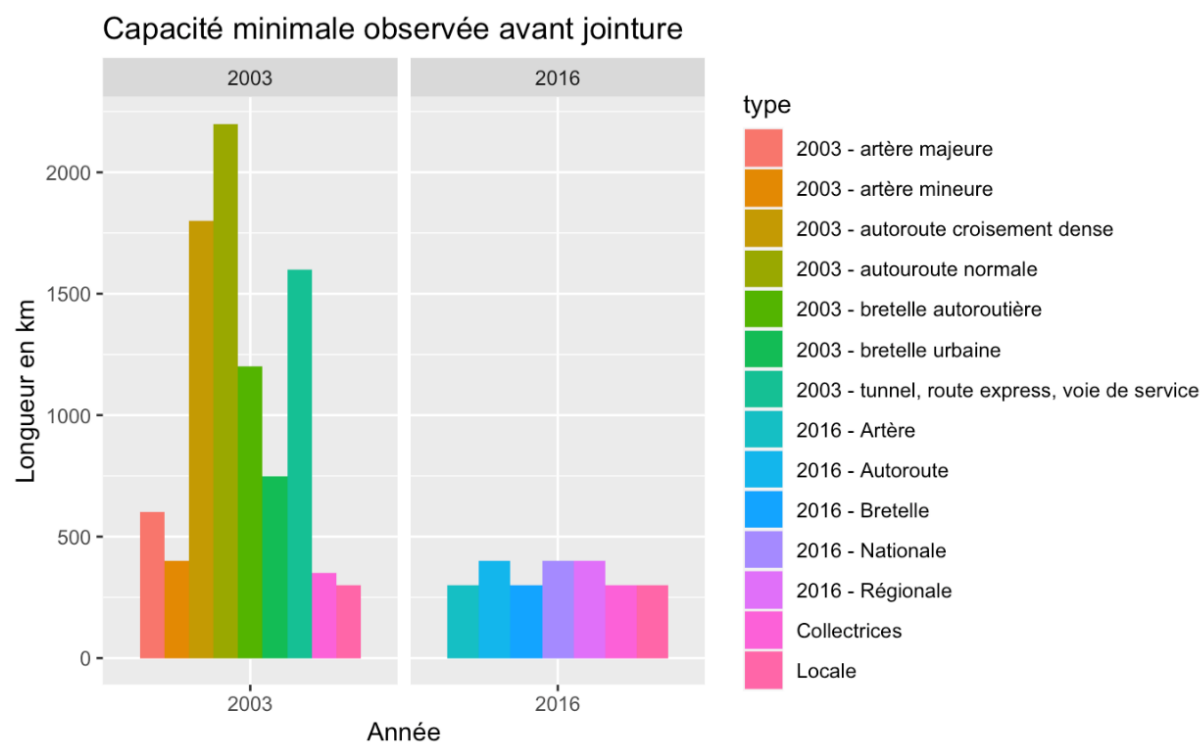


Figure 3.6 Capacités minimales observées avant jointure - réseau Motrem

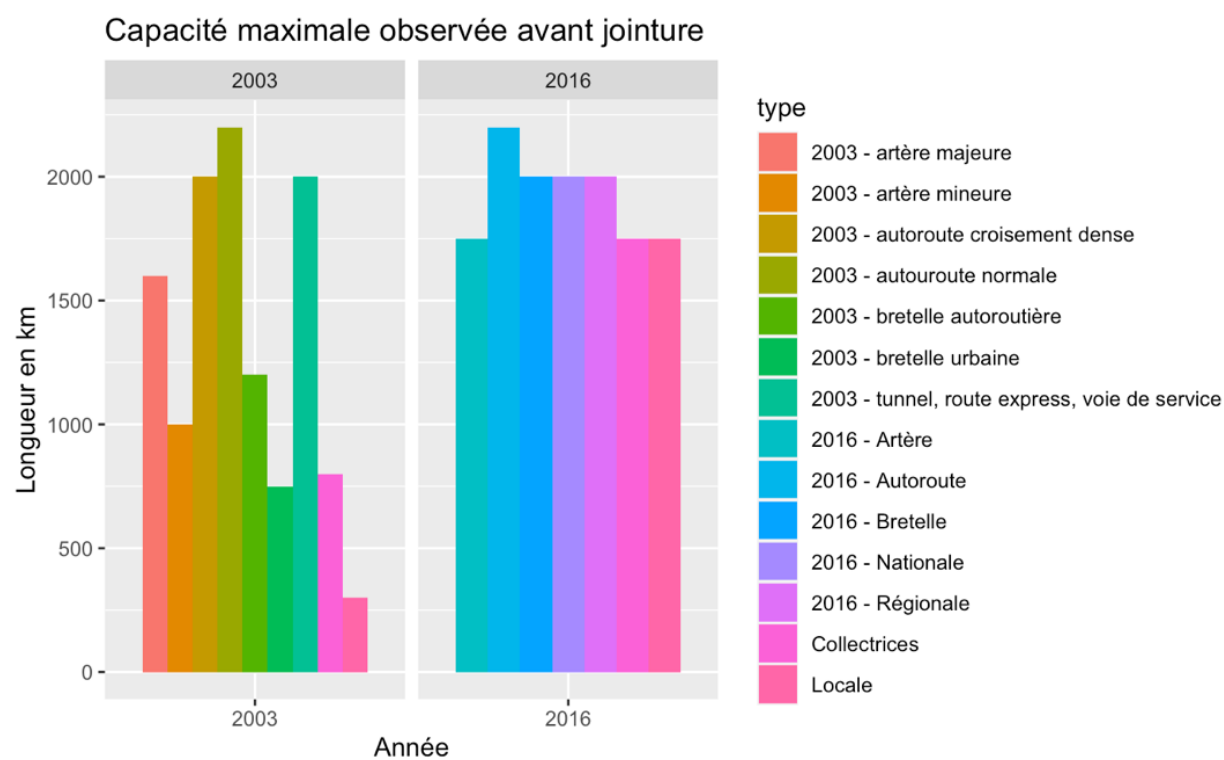


Figure 3.7 Capacités maximales observées avant jointure - réseau Motrem

En nous intéressant cette fois-ci à un secteur ayant subi une réelle transformation, l'ouverture de la partie est de l'Autoroute de l'acier (A30 partie est), qui est survenue entre 2003 et 2016, on remarque en analysant visuellement le réseau que le tracé de l'autoroute est bien présent en 2016 comme en atteste la Figure 3.8 ci-après.

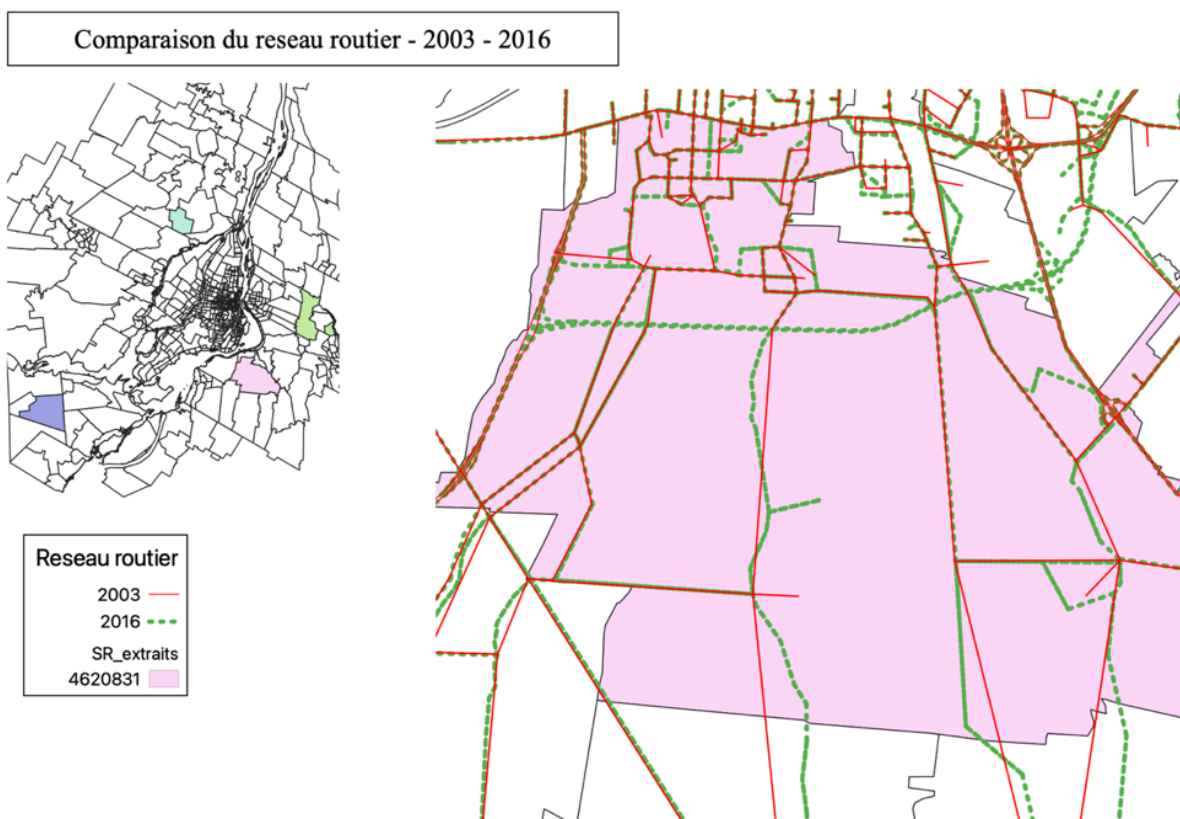


Figure 3.8 Analyse rapprochée du réseau routier Motrem 2003-2016 – cas de l'A30 est

La Figure 3.9 représente la longueur des segments classifiés du réseau codé pour ce, en comparant les longueurs pour chaque classe de route entre 2003 et 2016, on observe moins de bretelles, moins d'artères et plus de routes locales et régionales. On se demande alors si une telle modification a réellement eu lieu, ou s'il s'agit plus de modifications dans les modalités de codification du réseau.

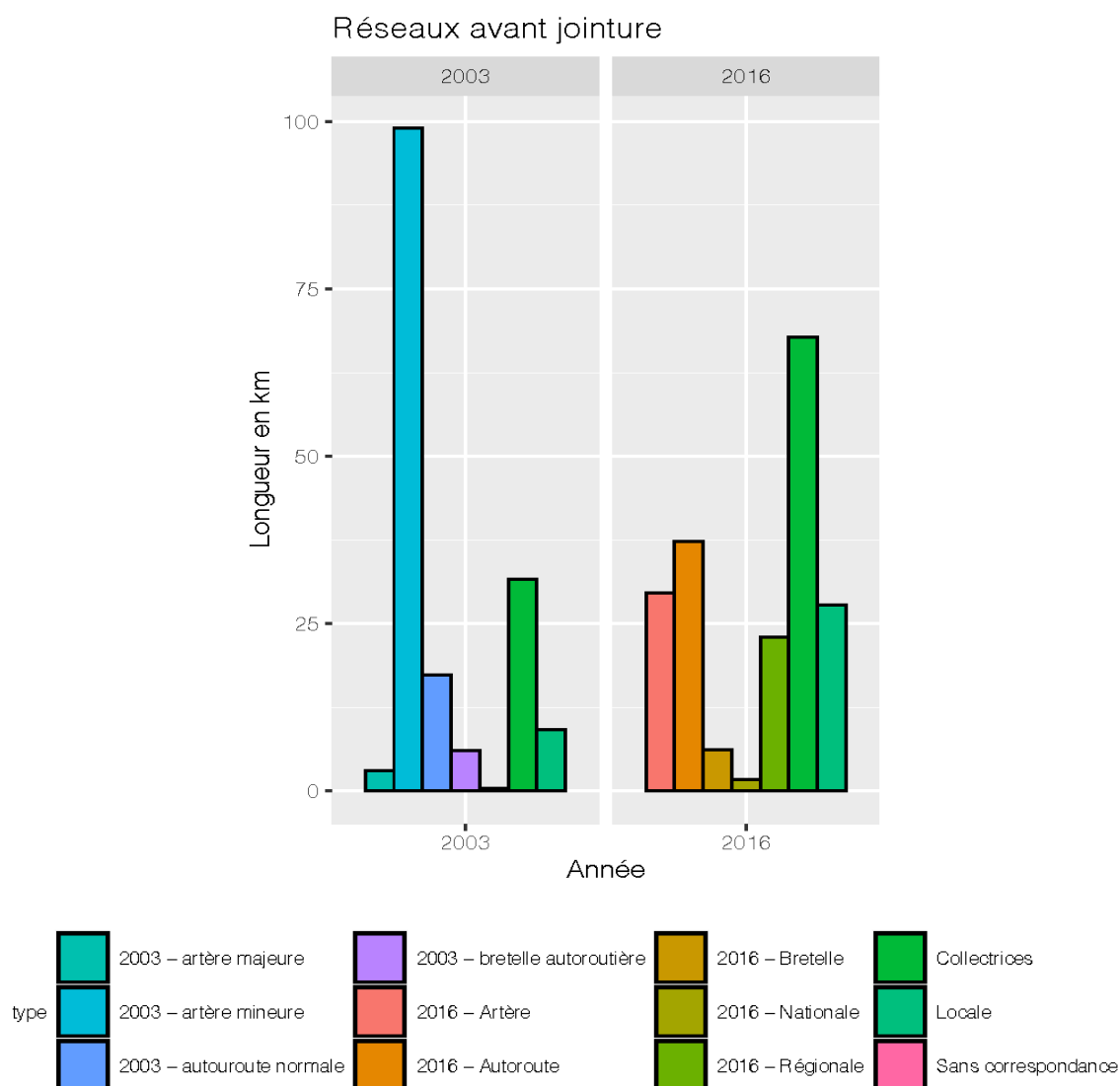


Figure 3.9 Compositions du réseau routier Motrem 2003-2016 – cas d'un secteur

Un algorithme de jointure a été testé sur ces données pour tenter de reconstituer au mieux le réseau historique. L'objectif d'un tel algorithme est de recréer un réseau historique aux caractéristiques géométriques fixes.

Les liens n'ayant pas connu de transformation entre deux années doivent garder la même géométrie et les mêmes caractéristiques. En repérant les liens ajoutés et ceux ayant subi une réelle transformation, il devient possible de caractériser l'évolution de l'offre routière. Le schéma de la Figure 3.10 résume l'approche utilisée pour l'algorithme de jointure :

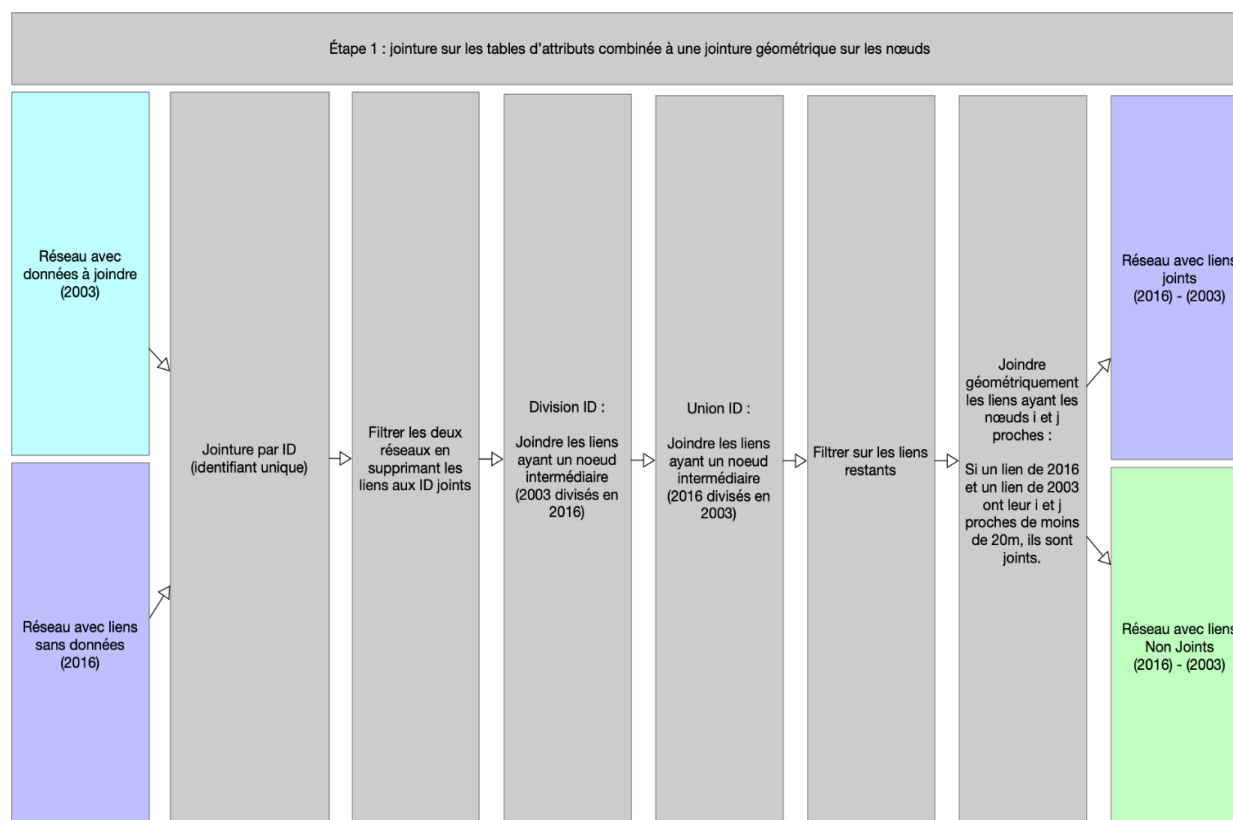


Figure 3.10 Méthodologie de jointure appliquée au réseau Motrem

L'algorithme permet de joindre une partie des segments, mais malheureusement les segments non joints représentent une part importante de l'ensemble du réseau. La Figure 3.11 ci-après en atteste en illustrant un comparatif de la composition du réseau joint et non joint pour 2016.

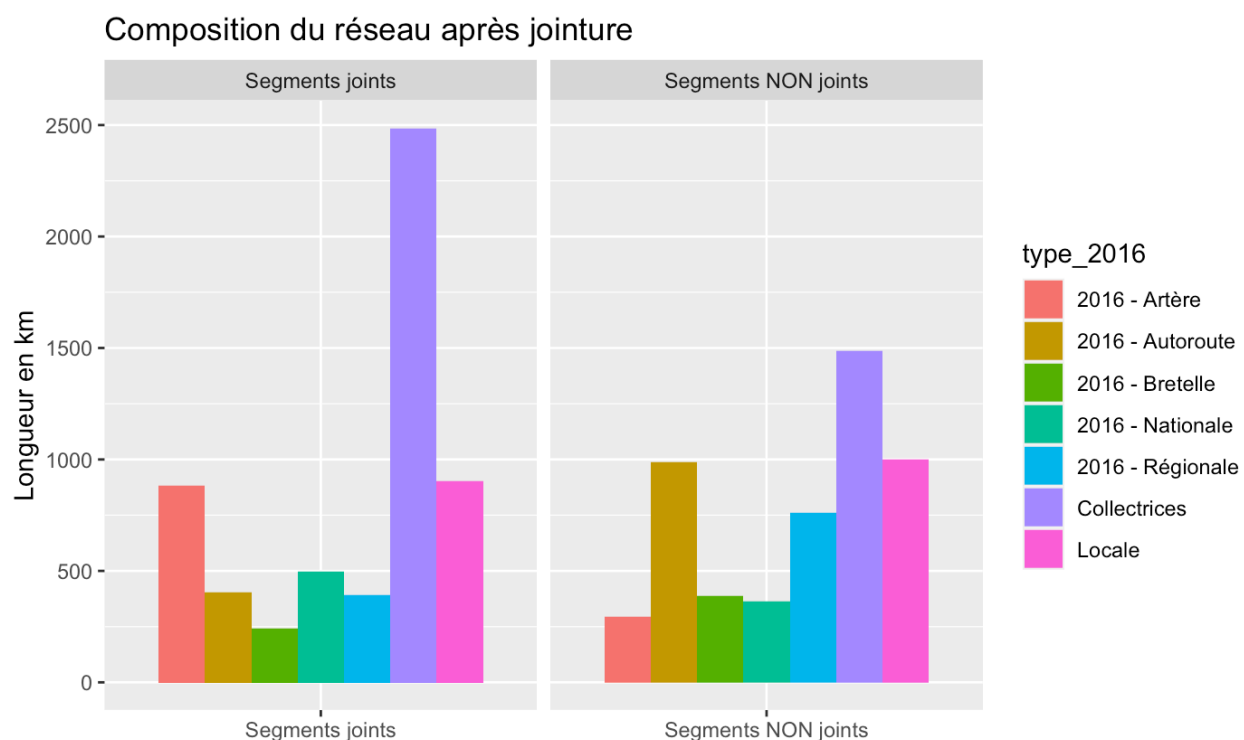
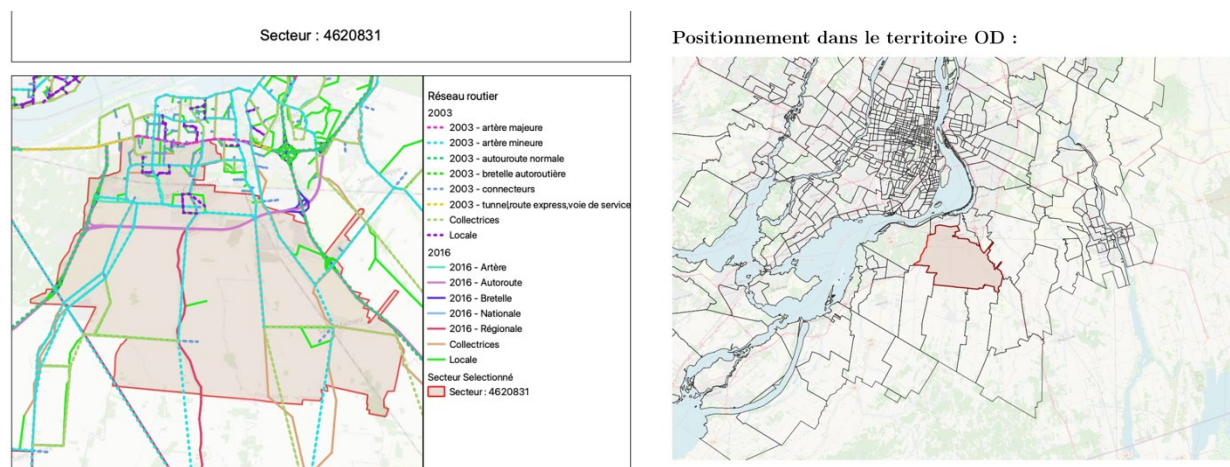


Figure 3.11 Composition du réseau Motrem après jointure

L'exploitation de cette base de données en l'état ne permet donc pas de clarifier les réelles modifications apportées au réseau routier et aux capacités disponibles.

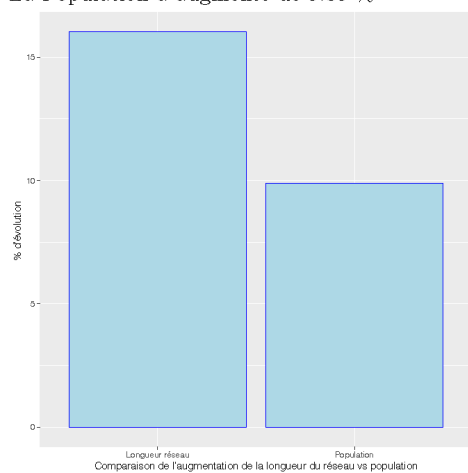
Pour capitaliser l'effort réalisé sur cet ensemble de données et permettre son raffinement futur, un algorithme est développé pour créer une fiche individuelle pour chaque secteur comportant statistiques, localisation, visualisation de la composition du réseau et résultats de l'essai de jointure. L'objectif est de visualiser et de permettre d'éventuelles corrections manuelles, ou de développer une meilleure approche pour les jointures, pour chaque secteur.

La Figure 3.12 et la Figure 3.13 illustrent l'exemple des deux parties d'une fiche générée.



Statistiques :

La surface du secteur est de **88.58 Km²**
 La longueur du réseau en **2003** est de 166.75 Km
 La longueur du réseau en **2016** est de 193.47 Km
 La longueur du réseau a augmenté de 16.02 %
 La Population a augmenté de 9.89 %



Population :

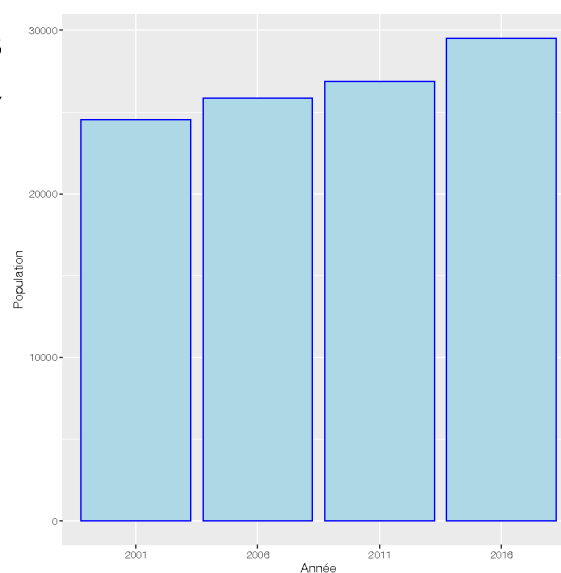


Figure 3.12 Exemple d'une fiche générée pour un secteur - réseau Motrem – statistiques.

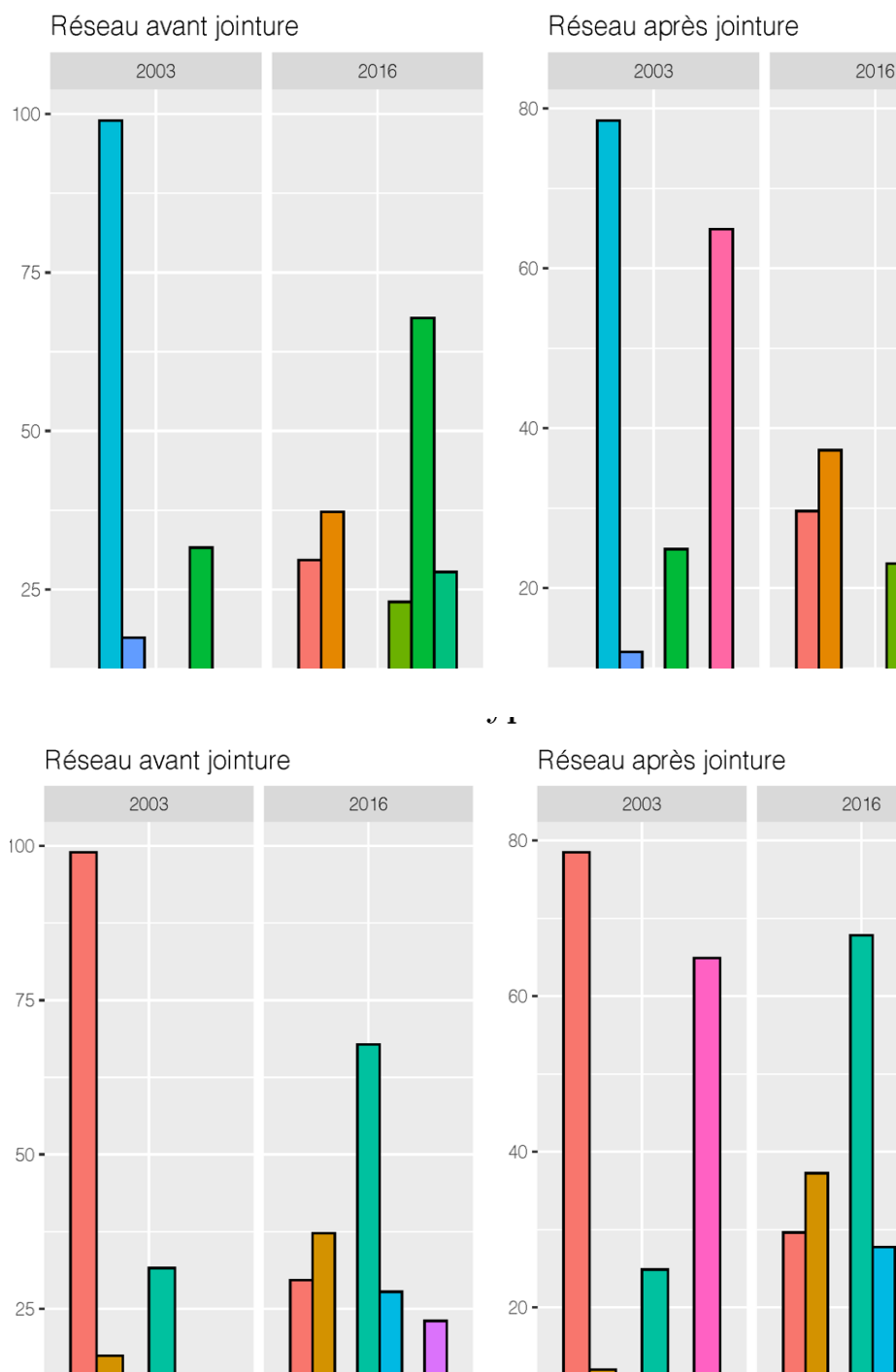


Figure 3.13 Exemple d'une fiche générée pour un secteur - réseau Motrem – réseau

Le raffinement de cette base de données n'étant pas réalisable dans les délais accordés au projet, un deuxième jeu de données est exploré pour tenter de caractériser l'évolution de la capacité routière.

3.4.2 Fichier principal des rues

Le Fichier principal des rues est issu de la banque de données de Statistique Canada.

Le réseau est disponible pour chacune des années d'intérêt. Là encore, les identifiants et la codification ont été modifiés à travers les années, mais l'enjeu principal rencontré est l'absence de l'attribut "nombre de voies". Une jointure spatiale ne sera pas d'une grande utilité vu l'absence de cette donnée. La finalité étant de pouvoir affecter des capacités aux segments routiers, il a été décidé d'écarter cette base de données.

3.4.3 Réseau Adresses Québec (AQ)

La 3^e base de données explorées est celle d'adresse Québec (adresse Québec Pro et adresse Québec Direction). Les données des réseaux ont pu être récupérées pour les années 2003, 2008, 2013, 2016 et 2019. Là encore, les identifiants (Id) des segments routiers changent à travers les années (un même segment n'a plus le même identifiant) et la codification des liens est modifiée également.

Cependant entre 2019 et 2016, les identifiants ne semblent pas avoir été modifiés, mais une jointure attributaire n'a permis de joindre que 34% des segments.

Cela s'explique par la modification géométrique des liens (découpage – fusion, modification de tracé...) qui entraîne la modification et la création de nouveaux identifiants. Une piste serait d'explorer une jointure spatiale, mais même en réussissant cette jointure, un deuxième enjeu qui est l'absence du nombre de voies (sauf pour les données de 2016) rendrait cette jointure inexploitable pour calculer l'évolution des capacités routières.

Ce réseau a donc également été écarté pour cette analyse.

3.4.4 Réseau Canvec

Le dernier réseau exploré, et le plus prometteur, est la base de données du réseau Canvec, de Ressources naturelles Canada. Les données ont été obtenues pour les années 2015, 2013 et 2009. Il s'agit ici d'un réseau de segments routiers qui semble visuellement correspondre aux tracés d'Open Street Map et qui comporte des données sur le nombre de voies et la classification des segments pour les 3 années.

3.4.4.1 Création du réseau historique

La classification a encore été modifiée au travers des années. En nous intéressant à la distribution des classes à travers les années, on obtient la Figure 3.14. On remarque l'impact de la modification de classification à travers les années : des routes locales n'ont sans doute pas été détruites entre 2013 et 2015; on peut supposer que les segments ont changé de classification entre les deux bases de données.

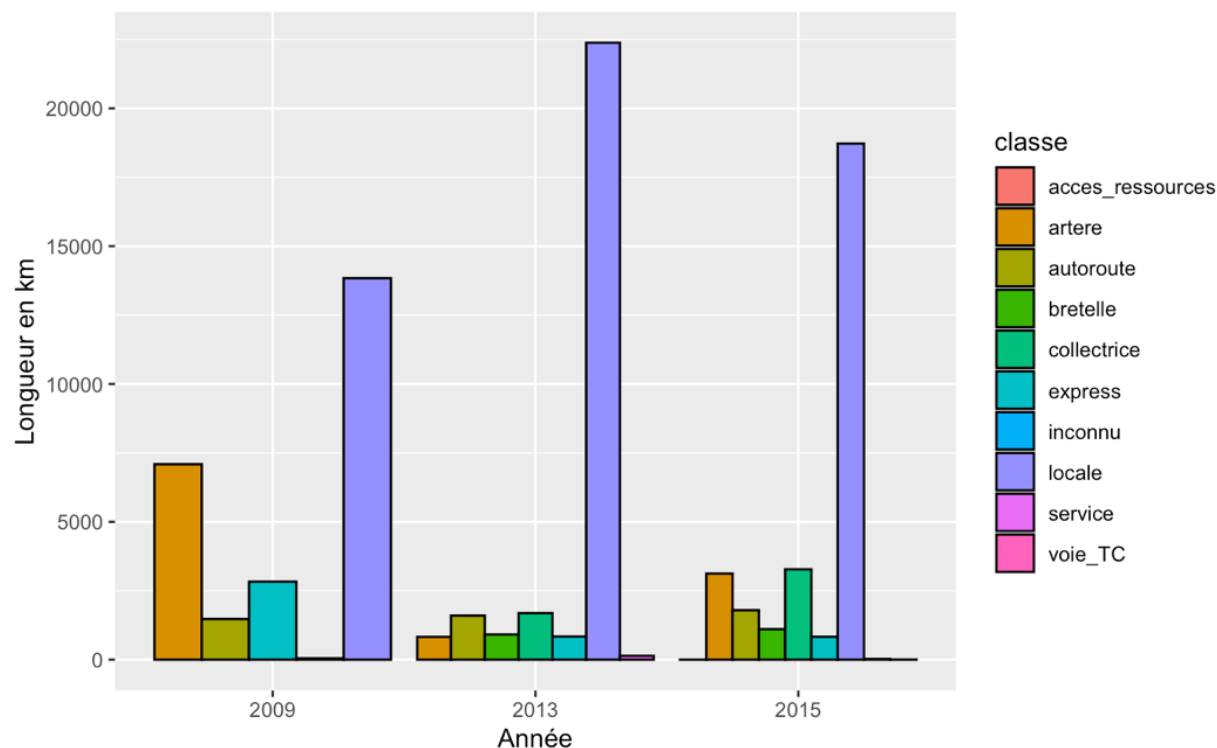


Figure 3.14 Classifications du réseau historique Canvec

En appliquant un filtre sur les classifications d'intérêt (on ne garde que le réseau supérieur), on obtient la composition suivante (voir Figure 3.15). On observe que plusieurs segments classés comme artère ou voies express en 2009 ont vu leur codification modifiée en bretelle et collectrice.

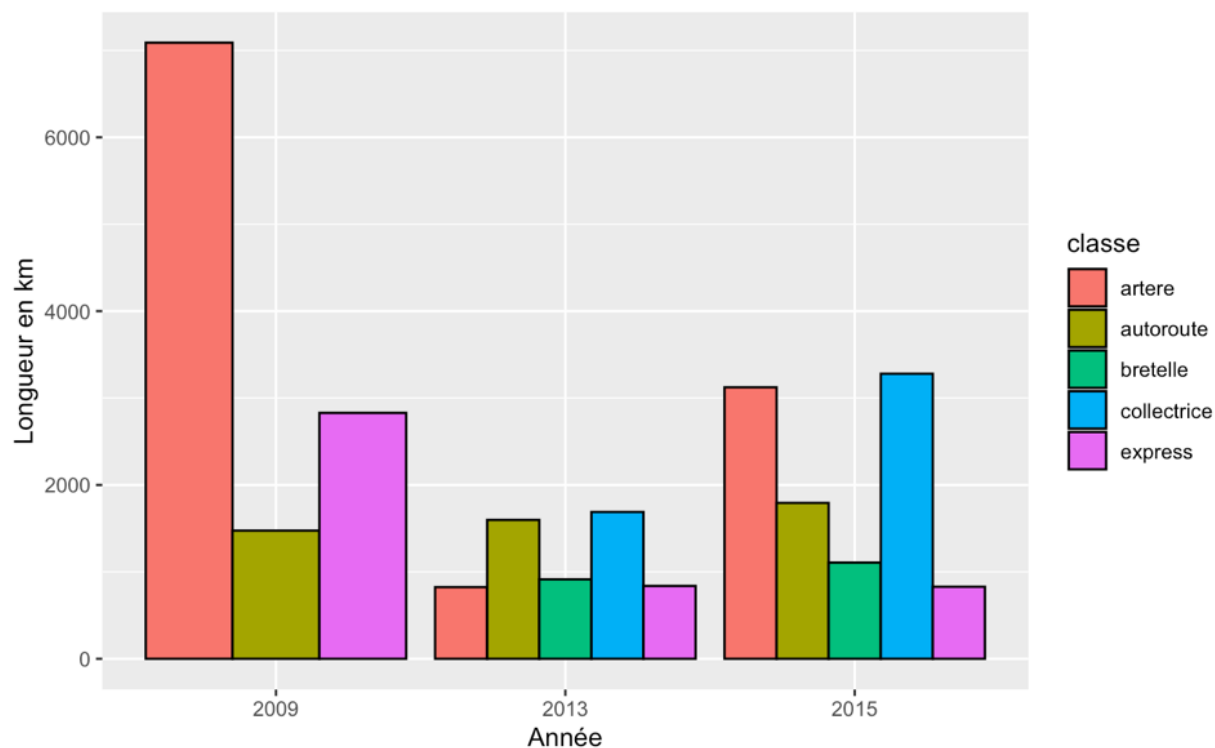


Figure 3.15 Classifications du réseau supérieur Canvec

La méthodologie pour exploiter au mieux ces données réside donc en l'application d'une jointure spatiale pour recréer un réseau routier comportant les attributs historiques des années précédentes.

Pour se rapprocher au mieux de nos années référence, on traitera les deux années 2009 et 2015.

La Figure 3.16 représente les réseaux de 2009 et 2015.

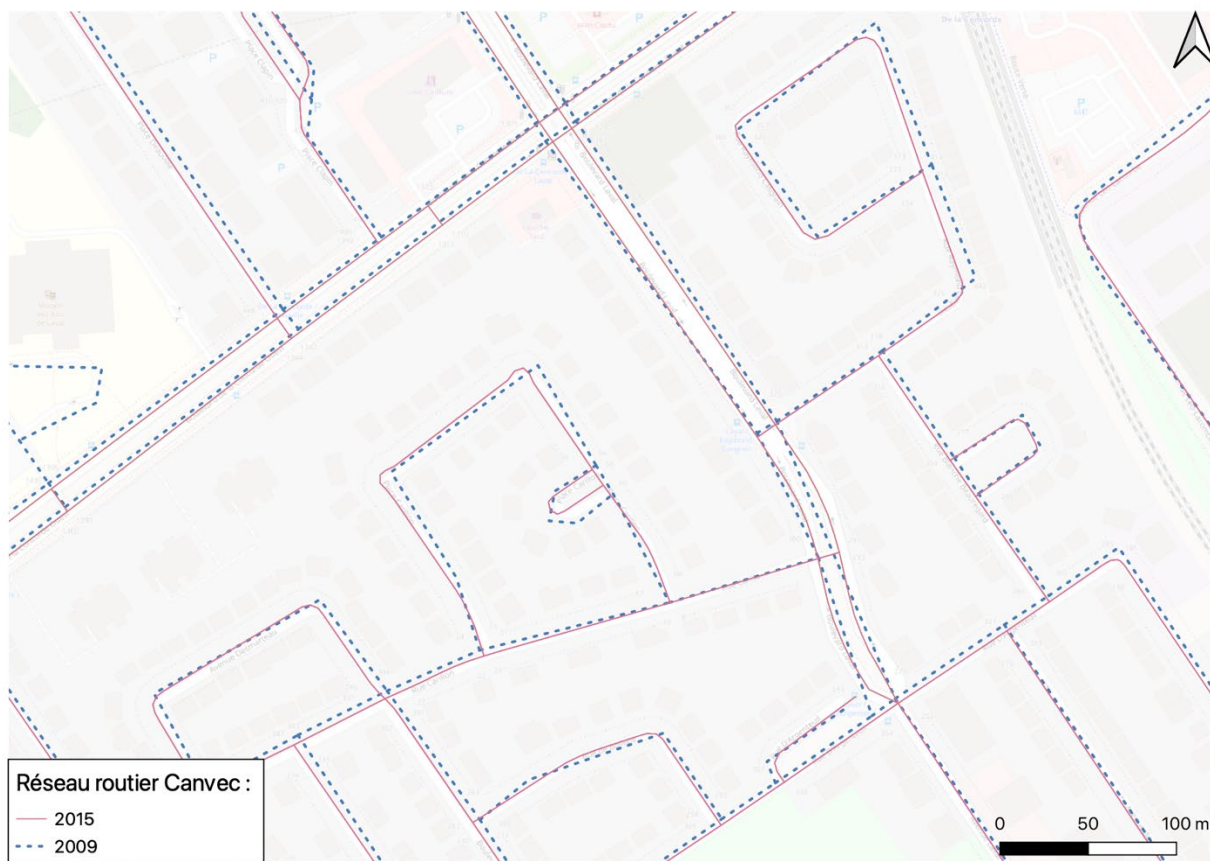


Figure 3.16 Illustration des réseaux de 2015 et 2009 - Canvec

Le réseau le plus récent (2015) est donc considéré, et la jointure spatiale se fait grâce à l'algorithme ci-après :

Étape 1 : décomposer les réseaux de 2009 et de 2015 en tronçons d'au plus 100 mètres. La Figure 3.17 présente le résultat obtenu pour un tronçon de 2015.



Figure 3.17 Découpage en tronçons de 100 m – réseau 2015

Étape 2 : refaire de même pour 2009 (voir une illustration à la Figure 3.18).



Figure 3.18 Découpage en tronçons de 100 m - réseau 2009

Étape 3 : rechercher le tronçon de 100 m de 2015 le plus près de celui de 100 m de 2009, tant que la distance est inférieure à 20 m.

Étape 4 : finalement, supprimer toutes les différences d'angle entre 25 et 155 degrés ainsi qu'entre 205 et 335 degrés. La Figure 3.19 illustre l'intervalle d'angles ayant été retenus pour la jointure géométrique. L'objectif est de ne garder que les tronçons qui forment un angle inférieur à 50 degrés entre eux.

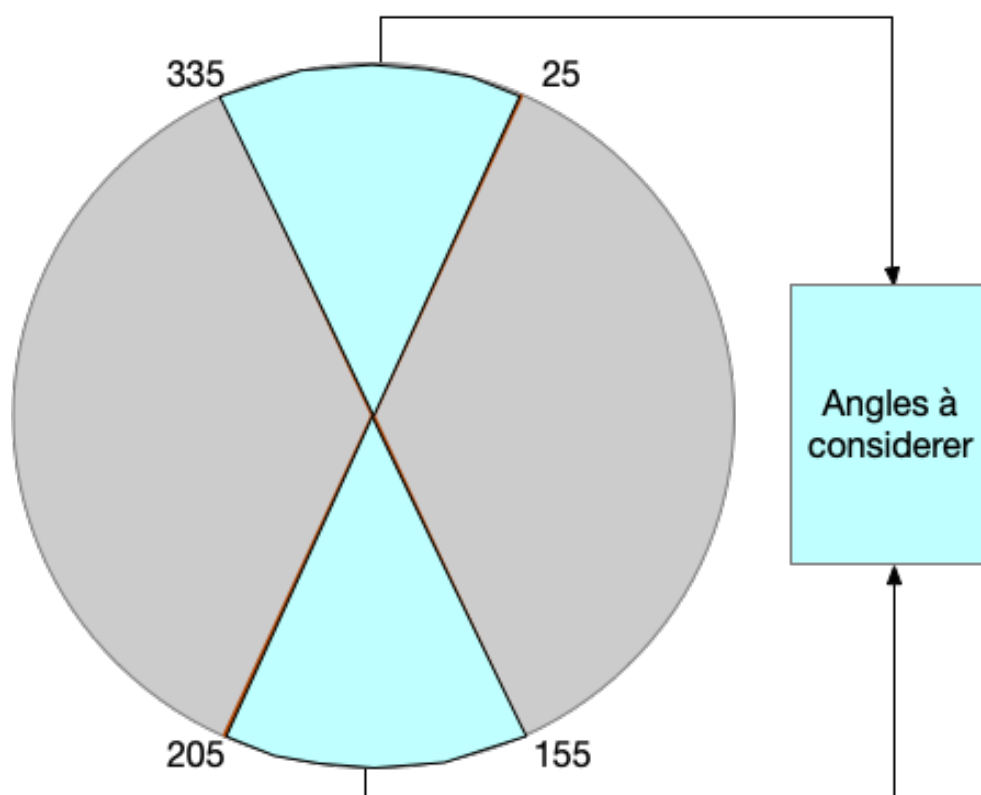


Figure 3.19 Angles retenus pour la jointure spatiale - Canvec

Plusieurs longueurs de découpage de segments ont été testées, le Tableau 3.4 fait état des résultats obtenus. Au vu de ces résultats, et pour ne pas alourdir les temps de calcul, un découpage en segments de 100 m sera retenu et utilisé comme réseau de base pour l'analyse de la capacité routière et de son évolution.

Tableau 3.4 Comparatif de la performance de jointure en fonction des longueurs de segments

Longueur de segmentation	NB segments 2009	NB segments 2015	NB segments joints	% segments joints /2015
25m	1063173	1228928	1025672	83,5%
50m	563290	657900	548776	83,4%
100m	309576	369427	305579	82,7%
150m	232522	283661	232196	81,9%

3.4.4.2 Affectation des capacités

L'étape suivant la reconstitution du réseau historique est l'affectation des capacités, exprimées en uvp/h, aux segments du réseau.

Parmi les bases de données traitées, seules les données Motrem disposent de capacités routières, une extraction des capacités par classe de segment routier est donc nécessaire pour les réaffecter au réseau Canvec.

Le choix de la base de données Motrem se justifie par le fait qu'il s'agit de la base utilisée au niveau du territoire montréalais pour modéliser l'offre et la demande routière. Le fait d'utiliser des capacités tirées de la littérature risque de ne pas être représentatif de l'état réel du réseau.

Le réseau Motrem de 2016 a été considéré et la capacité la plus fréquente par classe de route a été extraite (voir Tableau 3.5).

Tableau 3.5 Capacité la plus fréquente par classe de segment routier – Motrem 2016

Classe de route – réseau Motrem 2016	Capacité la plus fréquente (uvp/h)
Artère	400
Autoroute	2000
Bretelle	1200
Collectrices	300
Locale	300
Nationale	1400
Régionale	1400

Une table d'équivalence est ensuite créée pour relier les classes des deux bases de données entre elles. Le Tableau 3.6 illustre les équivalences retenues.

Tableau 3.6 Table d'équivalence entre segments Motrem et Canvec

Classe de route – réseau Motrem 2016	Classe équivalente - Canvec	Capacité la plus fréquente (uvp/h)
Artère	artère	400
Autoroute	autoroute	2000
Bretelle	bretelle	1200
Collectrices	collectrices	300
inconnu	Voie TC	-
inconnu	service	-
inconnu	Accès ressources	-
inconnu	inconnu	-
Locale	locale	300
Nationale	express	1400

En affectant les capacités aux segments du réseau Canvec, il est désormais possible d'extraire les VKT offerts sur chaque secteur.

Une correction se fait également au niveau du nombre de voies renseignées entre 2009 et 2015. L'objectif principal de cette correction est de ne pas supprimer systématiquement de l'analyse les liens ayant cet attribut manquant dans une des deux bases de données (nombre de voies connu en 2009 et non renseigné en 2015 par exemple).

Une fois le traitement de la base de données achevé, le calcul de la densité de VKT offerts peut se faire grâce à la formule :

$$VKT_{offerts\ par\ km^2} = \frac{\sum_{segments} (Longueur_{segment} \times Capacité_{segment})}{Surface\ du\ secteur\ en\ km^2}$$

Une fois l'ensemble des calculs réalisés, des fiches (exemple en Annexe B-E) pour chacun des secteurs (690 au total) sont générées et permettent de visualiser des statistiques par secteur (population, surface, composition et longueur du réseau, VKT offerts). L'objectif est là aussi, comme évoqué lors du traitement du réseau Motrem, de permettre un raffinement manuel ou d'initier une réflexion sur une meilleure méthodologie d'association des attributs historiques.

Cette étape permet donc de finaliser le traitement des capacités routières offertes par secteur. Il est tout de même important de noter les limitations engendrées par cette approche :

- Le calcul s'est fait uniquement pour deux années, 2015 et 2009, l'enjeu principal étant l'absence de données pour l'ensemble des années de référence du projet. Cela permet néanmoins d'avoir un pas de 5 ans à analyser conjointement avec l'évolution de l'étalement urbain.
- Le calcul se fait à l'intérieur d'un secteur; l'effet frontière reste donc important vu que les capacités des segments des secteurs adjacents ne sont pas considérées dans le calcul de la capacité offerte aux résidents d'un secteur.

3.5 Demande en transport

L'objectif est de pouvoir expliquer la variabilité et les interactions entre le phénomène d'étalement urbain et la demande en transport.

On s'intéresse notamment aux impacts sociodémographiques et d'utilisation sol sur la consommation de VKT d'une part, et aux impacts de l'augmentation de capacité routière d'autre part.

Comme mentionné dans la section traitant de la revue de littérature, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'effet de la demande induite en transport et à l'impact de schémas de développement urbain sur la demande en transport.

Des modèles de régression et d'équations structurelles sous diverses formes sont utilisés pour démontrer l'effet inhérent de la structure urbaine (bâtiment et réseau routier) sur la demande en transport. Il ressort de ces travaux que la variable explicative est souvent le nombre de véhicules

kilomètres parcourus. Cette variable est utilisée sous plusieurs formes et transformations qui varient en fonction des distributions et du type de données analysées.

Une analyse descriptive des variables citées précédemment permet de mieux visualiser les différents profils des secteurs. Des calculs d'élasticité permettent par la suite de mettre en lumière l'impact de l'étalement urbain et de la capacité routière sur la demande induite.

Pour le premier modèle exploré, la variable explicative retenue à la lumière de cette revue de littérature est donc le nombre de véhicules-kilomètres totaux (VKT) parcourus par personne. Le modèle est un modèle de régression linéaire simple permettant d'expliquer et d'interpréter la variabilité de la demande (exprimée en VKT/personne).

Le calcul des VKT se fait grâce aux données de l'enquête Origine Destination (OD). Les cohortes ciblées sont les répondants adultes possédant le permis de conduire et ayant déclaré un déplacement en auto. Les distances extraites correspondent aux distances sur le réseau routier du déplacement déclaré.

Les deux équations suivantes permettent de calculer les VKT ainsi que les VKT par personne pour un secteur donné.

$$VKT_{consommés_{secteur}} = \sum_i d_i \times facper$$

Avec :

- i = observation d'un déplacement effectué en auto conducteur d'un résident du secteur
- d_i est la distance sur le réseau routier correspondant au déplacement i en (km)
- $facper$ est le facteur de pondération du répondant ayant effectué le déplacement i

L'équation suivante est utilisée pour le calcul des VKT/personne pour un secteur :

$$VKT_{personne} = \frac{VKT_{secteur}}{Population\ du\ secteur}$$

L'expression de la formule du modèle de régression prend la forme ci-après :

$$VKT_{personne} \sim Densité_{population} + \sum_{types} I_{étalement} + rte_{voie} + auto_{voie} + revenu + essence$$

Avec :

- $VKT_{personne} = \frac{\text{Nombre de VKT consommés par les residents du secteur (VKT}_{secteur})}{\text{Population du secteur}}$
- $Densité_{population} = \frac{\text{Population du secteur}}{\text{superficie du secteur}}$
- $I_{étalement} = \text{variable binaire (0 ou 1)}$ caractérisant l'appartenance d'un secteur à un type d'étalement urbain. Lorsque le secteur est de type "dispersion" par exemple, alors $I_{dispersion} = 1$ et le reste des $I_{étalement} = 0$
- $auto_{voie} = \frac{\text{Longueur du réseau autoroutier} \times \text{nombre de voies}}{\text{superficie du secteur}}$
- $rte_{voie} = \frac{\text{Longueur du réseau routier autre que les autoroutes}}{\text{superficie du secteur}}$
- $revenu = \text{revenu median d'une personne habitant le secteur}$
- $essence = \text{prix moyen annuel de l'essence au niveau de la region d'appartenance du secteur}$

Les variables endogènes représentant l'étalement urbain sont des variables caractérisant l'utilisation de sol. La classification ayant déjà été faite, la variable retenue est une variable binaire $I_{étalement}$ caractérisant l'appartenance d'un secteur d'étude à la typologie d'étalement urbain. Ce choix se justifie, car il permet de considérer à la fois l'éloignement au centre-ville, le type d'utilisation de sol et le schéma de construction résidentiel en une seule variable, tout en éliminant le risque de corrélations entre les variables décrivant chacun des aspects des secteurs.

Vu que l'objectif est d'analyser l'impact de l'étalement urbain, on prend ici comme référence l'appartenance aux secteurs classifiés comme **centraux** (type = centralité) cela permet de déduire l'impact de l'appartenance à un secteur classifié comme plus étalé sur les VKT consommés par les résidents.

D'autres variables sont également testées vu leur potentiel impact sur la demande induite :

- $batiments = \text{nombre de batiments d'un secteur}$
- $logements = \text{nombre de logements d'un secteur}$

Mais des recherches de corrélations, préalables à l'injection des variables dans le modèle, sont nécessaires et permettent d'éviter d'inclure simultanément des variables fortement corrélées entre elles.

L'injection de variables dans le modèle de régression s'est faite par étape afin d'explorer l'effet sur les performances du modèle.

Le modèle a été appliqué aux données d'une seule année d'étude (2016). L'objectif est de clarifier les relations entre variables décrivant les trois sphères à l'étude. Cette étape permet de mieux appréhender les calculs d'élasticités, et de décrire l'impact de l'étalement urbain et l'évolution de l'offre sur la variabilité de la demande. Les données longitudinales seront utilisées à cette fin, cette section sera abordée lors de l'analyse croisée des résultats.

CHAPITRE 4 ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre traite de l'analyse des résultats obtenus. Pour rester fidèle au schéma méthodologique du projet, l'analyse se fera pour chacune des sphères à l'étude, de manière séparée, dans un premier temps pour analyser les profils et schémas d'évolution de chacune.

Par la suite, une analyse croisée fera ressortir les différentes interactions entre ces profils et permettra de tirer des constats de l'impact combiné de l'évolution de chacune des sphères.

4.1 Portrait de l'étalement urbain

Pour brosser un portrait du phénomène d'étalement urbain, on analysera d'abord les résultats de chaque indicateur avant de s'intéresser à la typologie d'évolution des secteurs.

4.1.1 Dispersion

Le premier indicateur analysé fait état du degré de dispersion : plus sa valeur est élevée et plus cela indique un étalement urbain. La Figure 4.1 représente sa distribution pour chacune des années de référence. On constate à travers cette distribution une légère augmentation des secteurs ayant une faible dispersion (entre 0 et 10), les secteurs ayant des valeurs assez faibles représentent près de 50% des secteurs analysés.

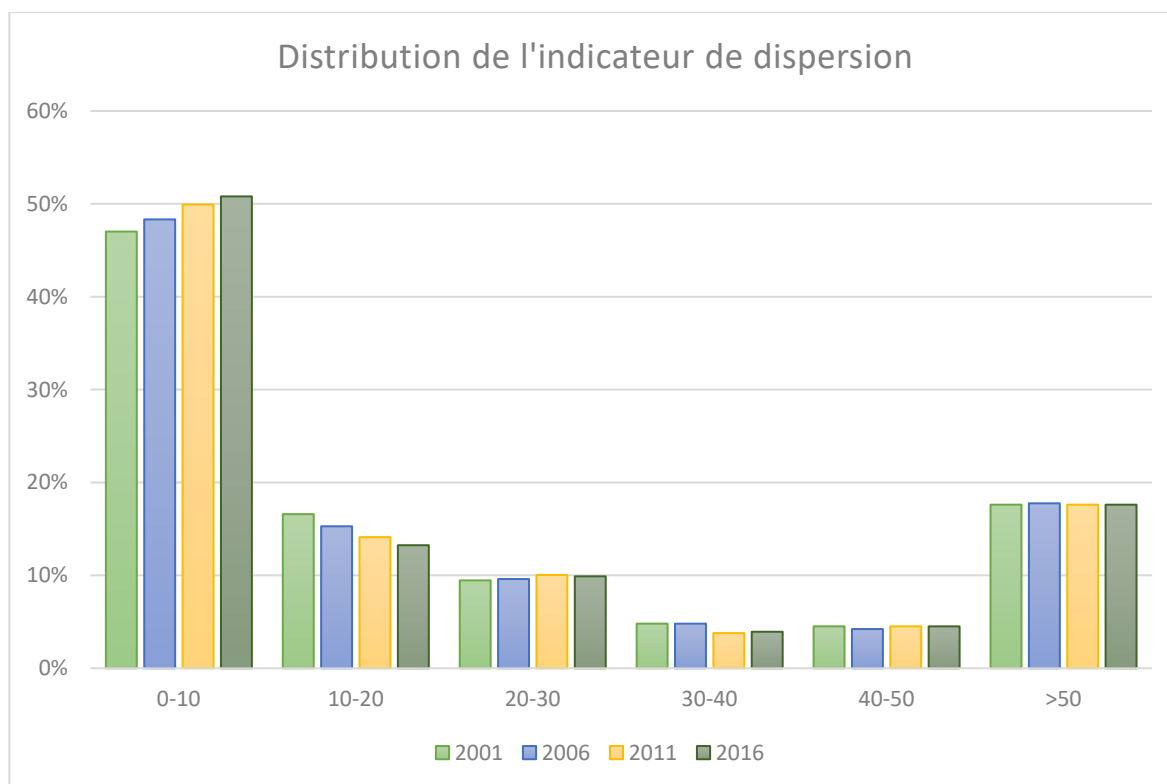


Figure 4.1 Distribution de l'indicateur de dispersion

Les secteurs ayant une forte valeur de dispersion (valeurs supérieures à 50) représentent environ 18% du nombre de secteurs analysés, cela peut sembler léger, mais en nous intéressant à leur emplacement et superficie, on constate, comme en atteste la Figure 4.2, qu'ils représentent une superficie non négligeable, notamment au niveau de la Couronne Nord en 2016.

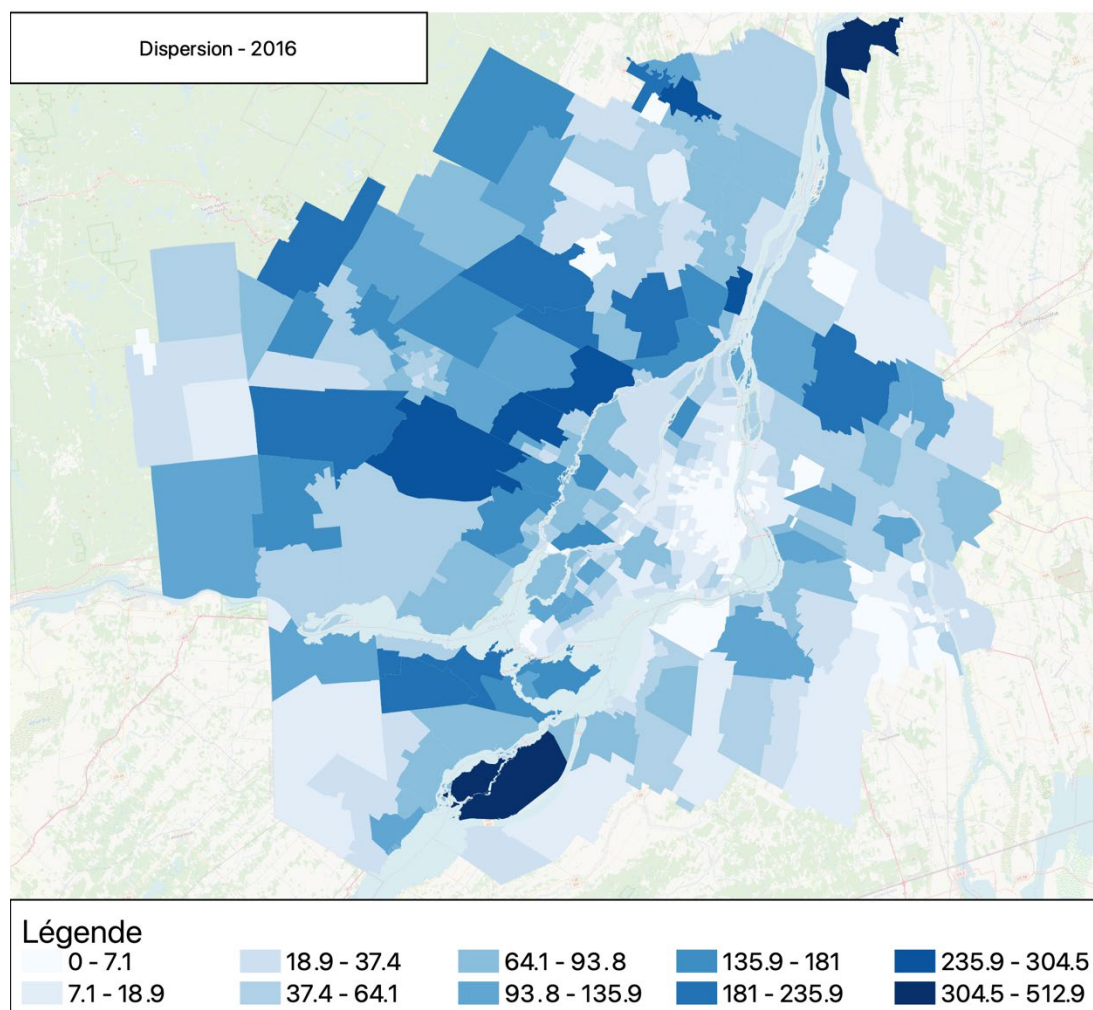
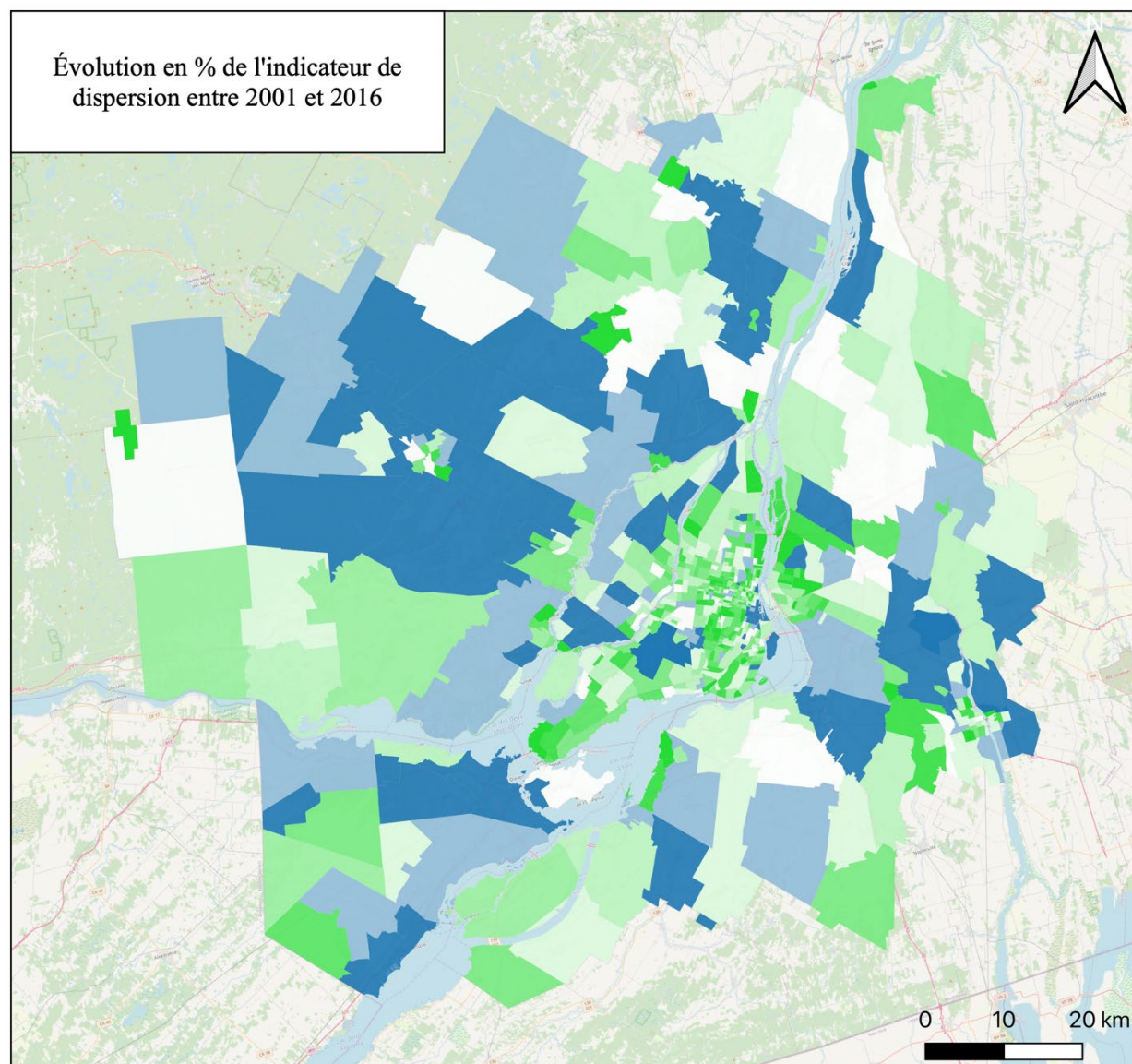


Figure 4.2 Répartition des valeurs de l'indicateur de dispersion par secteur - 2016

En comparant visuellement l'évolution des secteurs grâce à la Figure 4.3, on remarque que les secteurs en Couronne Nord ont subi le plus de transformations entre 2001 et 2016, et que les secteurs considérés les plus étalés (valeur élevée) par cet indicateur (Figure 4.2) ne sont pas systématiquement les secteurs aux extrémités du territoire, mais sont plutôt des secteurs formant une bande proche de l'Île de Laval et de l'Île de Montréal. Une illustration complémentaire des valeurs de cet indicateur pour chacune des années est en annexe M.



Évolution en % :

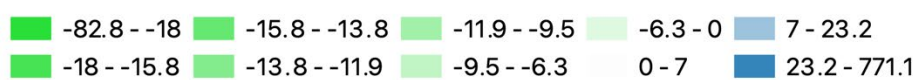


Figure 4.3 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de dispersion par secteur

4.1.2 Densité

Cet indicateur calcule la densité résidentielle en tenant compte de l'éparpillement des bâtiments au sein d'un secteur donné. Plus la valeur de cet indicateur est faible et plus cela est représentatif du phénomène d'étalement urbain. La Figure 4.4 représente la distribution de cet indicateur. On remarque à travers sa distribution que plusieurs secteurs sont classés comme étalés (valeur inférieure à 200) et qu'au travers des années, les secteurs gagnent en densité résidentielle vu que les valeurs basses diminuent au détriment de valeurs plus élevées (supérieures à 300 qui augmentent d'année en année).

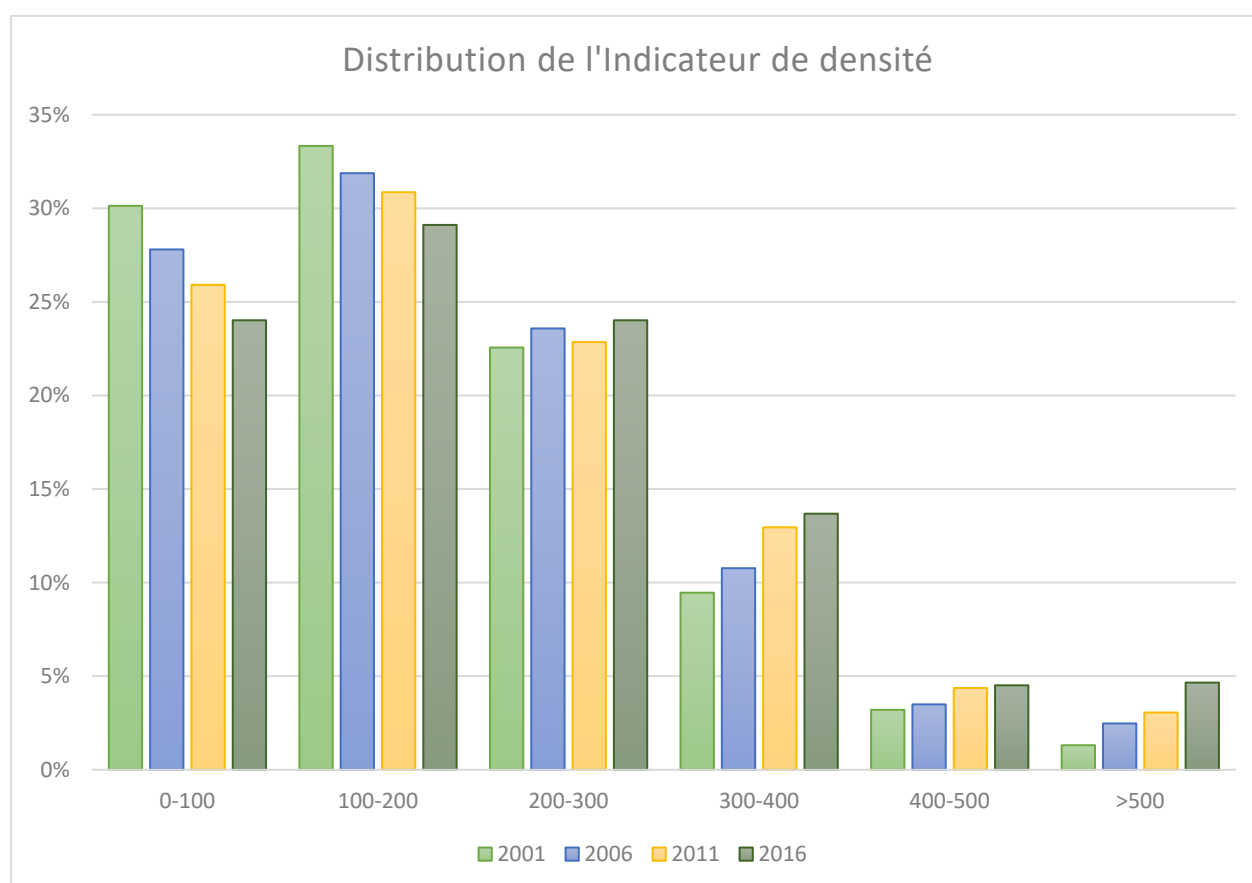


Figure 4.4 Distribution de l'indicateur de densité

En regardant de plus près l'évolution temporelle du territoire, illustrée par la Figure 4.5, on remarque que l'évolution se fait de manière assez radiale autour de l'Île de Montréal avec quelques zones particulières comme Saint-Jean-sur-Richelieu par exemple, où l'évolution se fait de manière radiale par rapport au centre de la municipalité.

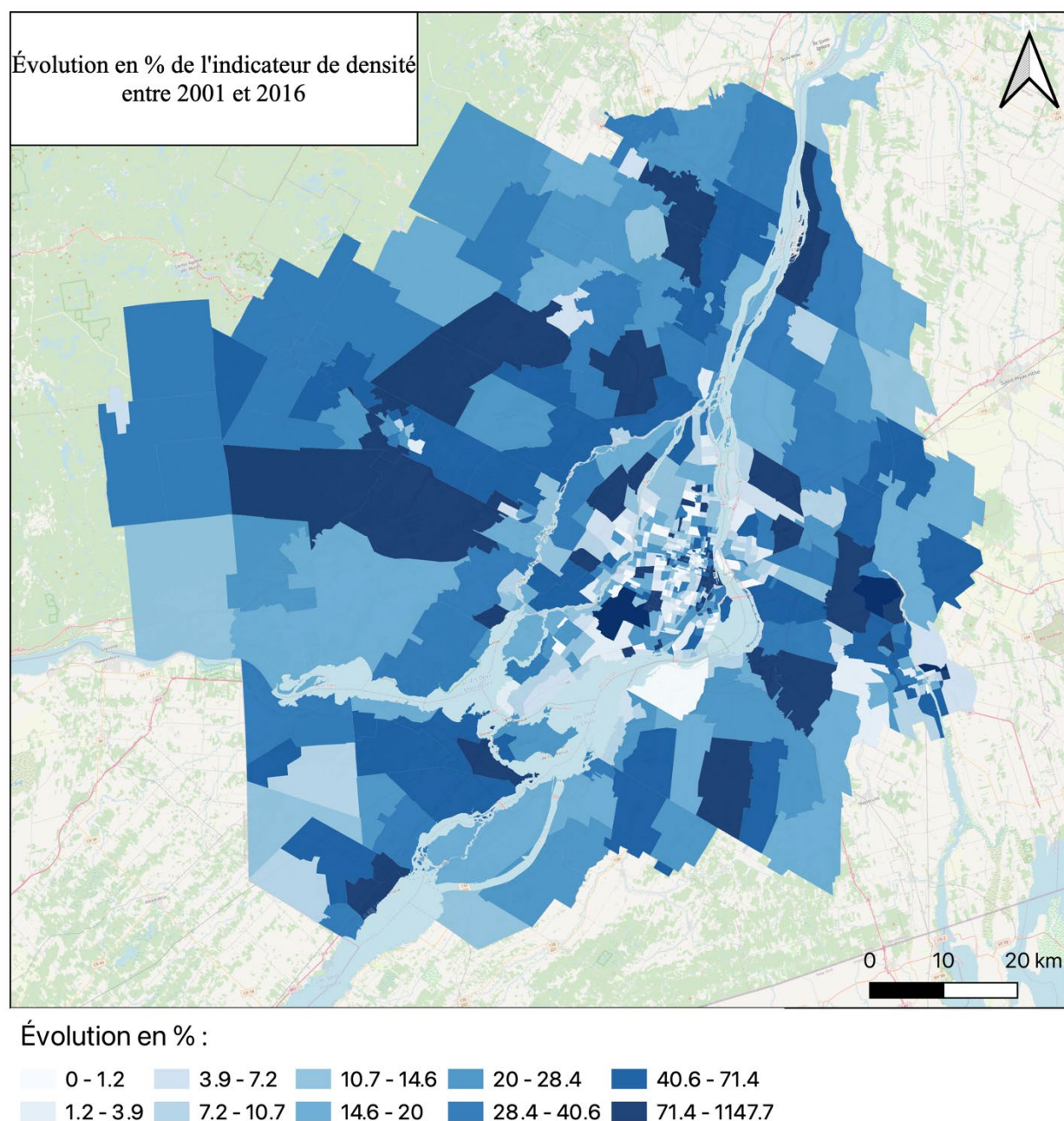


Figure 4.5 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de densité par secteur

Il est de tout même intéressant de constater que plusieurs secteurs dans les Couronnes Nord et Sud, même après 15 années, gardent toujours des valeurs d'indicateurs très basses (synonymes d'étalement urbain). Une illustration complémentaire des valeurs de cet indicateur pour chacune des années est en annexe N.

4.1.3 Concentration

La Figure 4.6 représente la distribution de l'indicateur de concentration, plus la valeur de cet indicateur est basse et plus cela est synonyme d'étalement urbain. En analysant la distribution de cet indicateur, on remarque que peu de secteurs ont subi des transformations au travers des années. Pour rappel, cet indicateur caractérise le degré auquel les constructions se sont faites de manière ininterrompue dans peu de kilomètres carrés (d'où l'appellation concentration) au sein d'un même secteur.

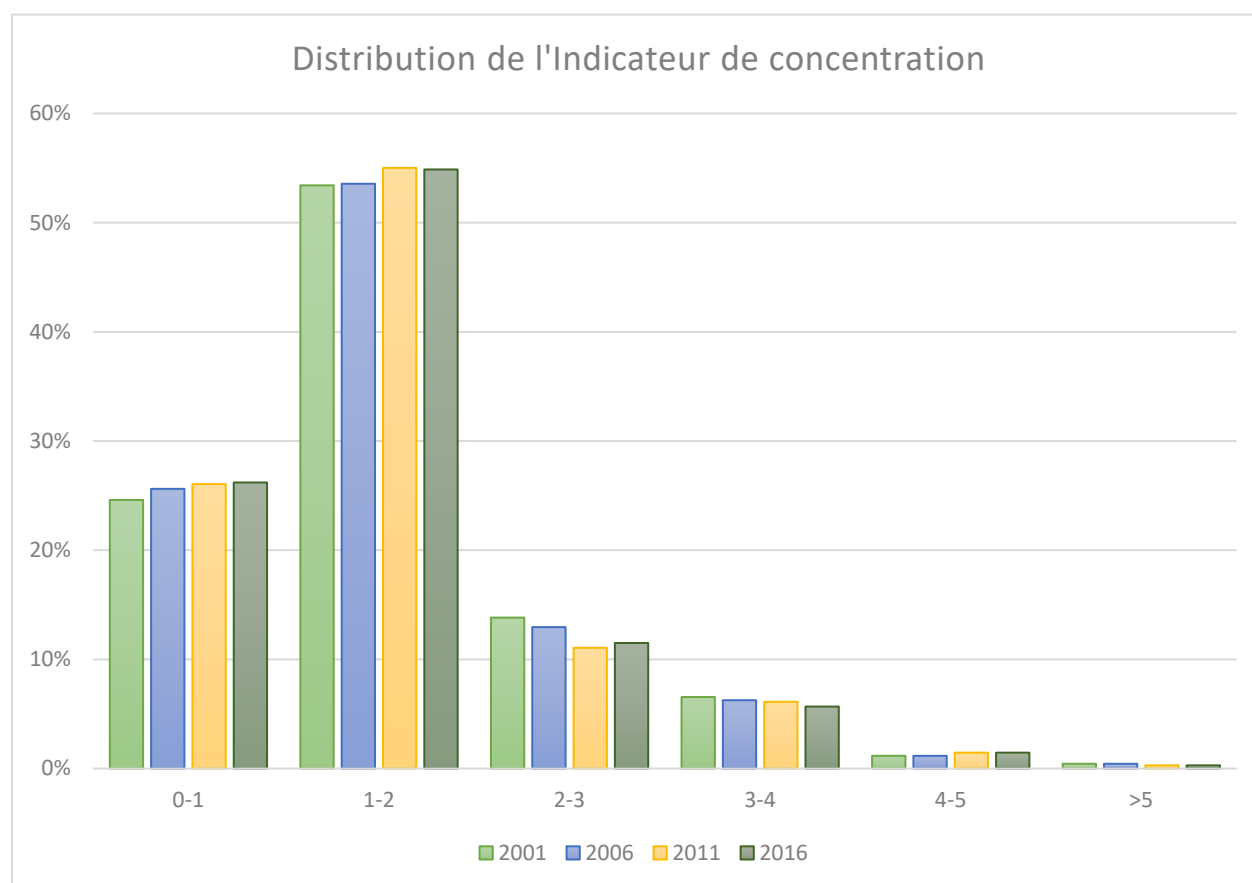


Figure 4.6 Distribution de l'indicateur de concentration

Peu de secteurs disposent d'une valeur élevée et cela démontre qu'en 15 ans, le développement résidentiel s'est fait généralement de manière non concentrée ou dispersée localement.

La Figure 4.7 représente l'évolution temporelle des secteurs par rapport à cet indicateur. le constat visuel des transformations (Figure 4.7), confirme une baisse des valeurs pour une grande partie des territoires en Couronnes, sachant que plus la valeur de cet indicateur est basse et plus cela est synonyme d'étalement urbain, on peut conclure à un effet plus prononcé de la prolifération du phénomène d'étalement urbain en Couronne Nord qu'en Couronne Sud

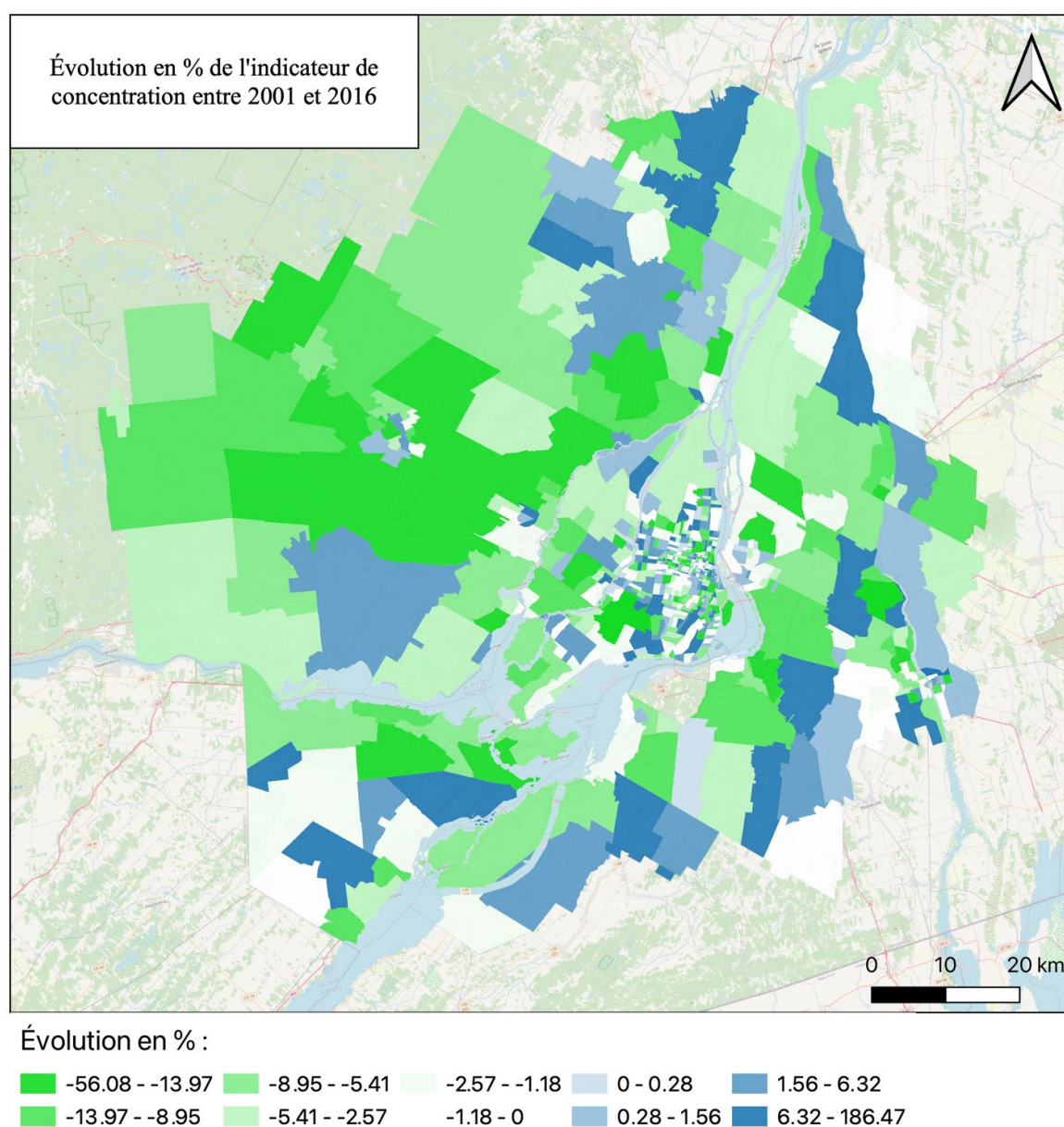


Figure 4.7 Comparatif historique des valeurs de l'indicateur de concentration par secteur

En s'intéressant de plus près à la Couronne Sud, on s'aperçoit que certains territoires ont vu leur indice augmenter entre 2001 et 2016. Si l'on combine ce constat aux observations issues de l'indicateur de densité, on peut en déduire que pour ces territoires, on a construit davantage, mais de manière dispersée.

Le centre-ville évolue très peu par contre, et cela est suffisamment intuitif si l'on considère le peu d'espace relativement disponible pour de nouvelles constructions (contrairement aux secteurs plus éloignés du centre par exemple). Une illustration complémentaire des valeurs de cet indicateur pour chacune des années est en annexe O.

4.1.4 Continuité

Pour rappel, la continuité est la mesure selon laquelle les terrains aménageables ont été construits (seuil de densité) de façon ininterrompue. La définition se rapproche de l'indicateur de concentration. La principale différence est que cet indicateur ne caractérise pas la nature concentrée dans un espace restreint de la construction résidentielle, mais il révèle plutôt la continuité du développement urbain des terrains aménageables. Une valeur basse est caractéristique de l'étalement urbain.

la Figure 4.8 représente sa distribution. Le constat que l'on peut tirer ici est qu'au travers des années, les territoires ont tendance à être construits de manière continue dans l'espace, le schéma de développement ne se fait donc pas de manière discontinue à l'intérieur d'un secteur. Néanmoins, la proportion des secteurs à faible indice de continuité reste tout de même importante. Cela reflète que le territoire souffre toujours de zones ayant des constructions éparpillées.

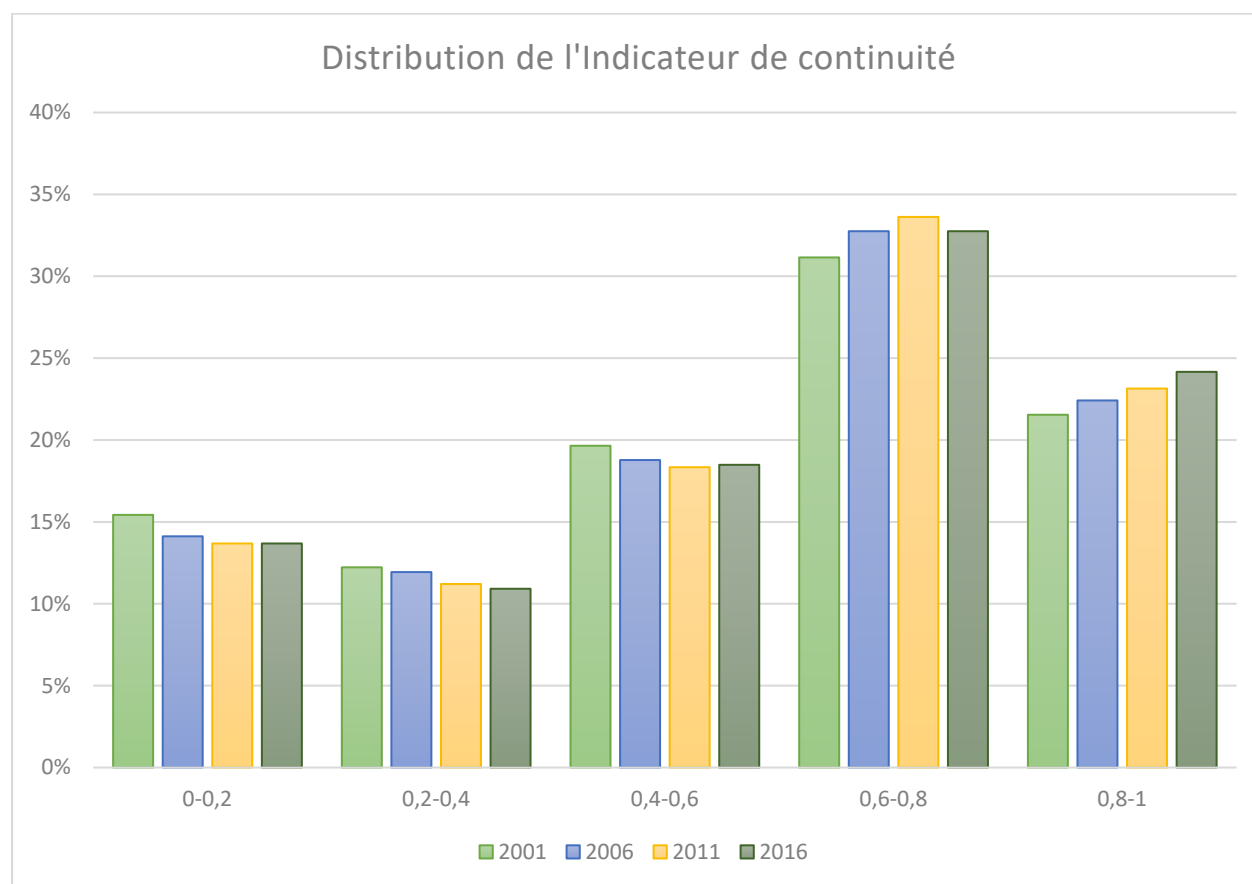


Figure 4.8 Distribution de l'indicateur de continuité

Ce constat se précise en observant l'emplacement et la superficie occupée par ces secteurs (voir Figure 4.9). Il est clair que les secteurs les plus continus sont concentrés au niveau de l'Île de Montréal, mais, fait intéressant, certains secteurs au niveau des Couronnes Nord et Sud reçoivent une valeur élevée et se classent également dans les secteurs continus.

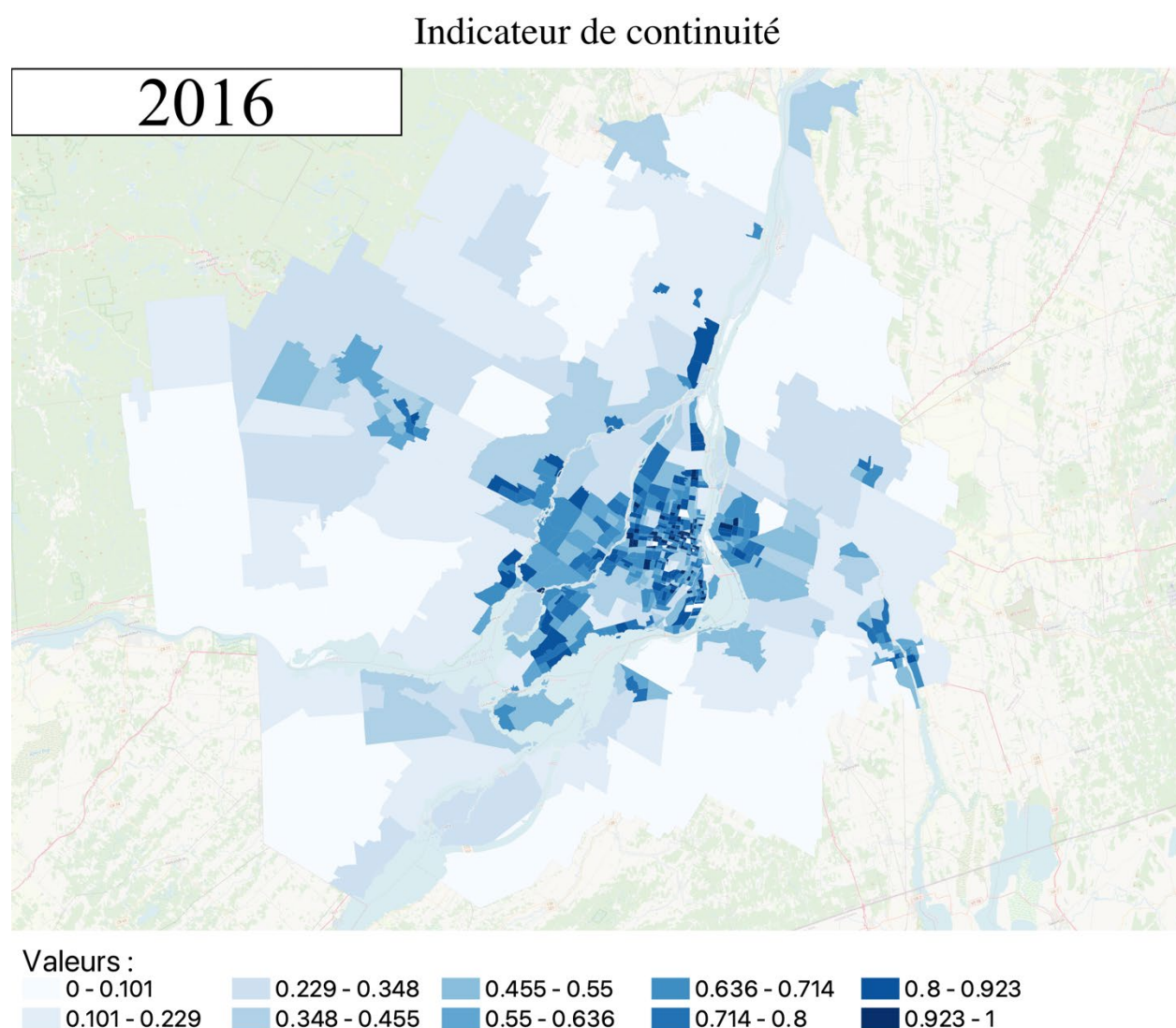
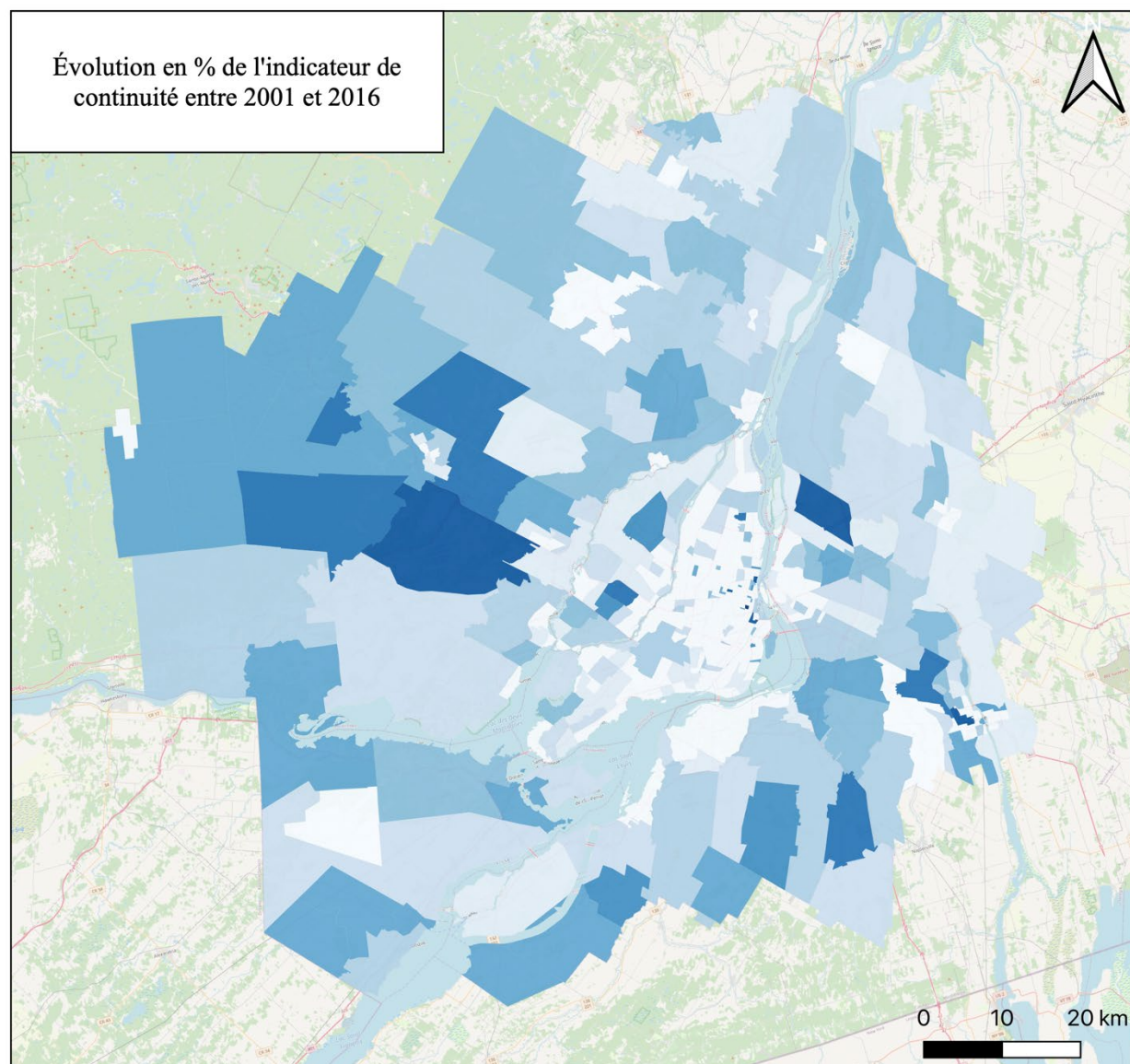


Figure 4.9 Valeurs de l'indicateur de continuité par secteur pour 2016

En analysant de plus près l'évolution des secteurs qui leur sont adjacents, on remarque grâce à la Figure 4.10 que des secteurs se développent de manière continue à travers les années autour de ces noyaux. Une illustration complémentaire des valeurs de cet indicateur pour chacune des années est en annexe P.



Évolution en % :



Figure 4.10 Évolution en % de l'indicateur de continuité

4.1.5 Centralité

Cet indicateur caractérise le degré auquel le développement résidentiel est situé à proximité du centre-ville, une valeur basse indique davantage d'étalement urbain.

Sa distribution représentée en Figure 4.11 démontre très peu de fluctuations en 15 ans, le pic étant atteint pour des valeurs assez basses (inférieures à 0,2).

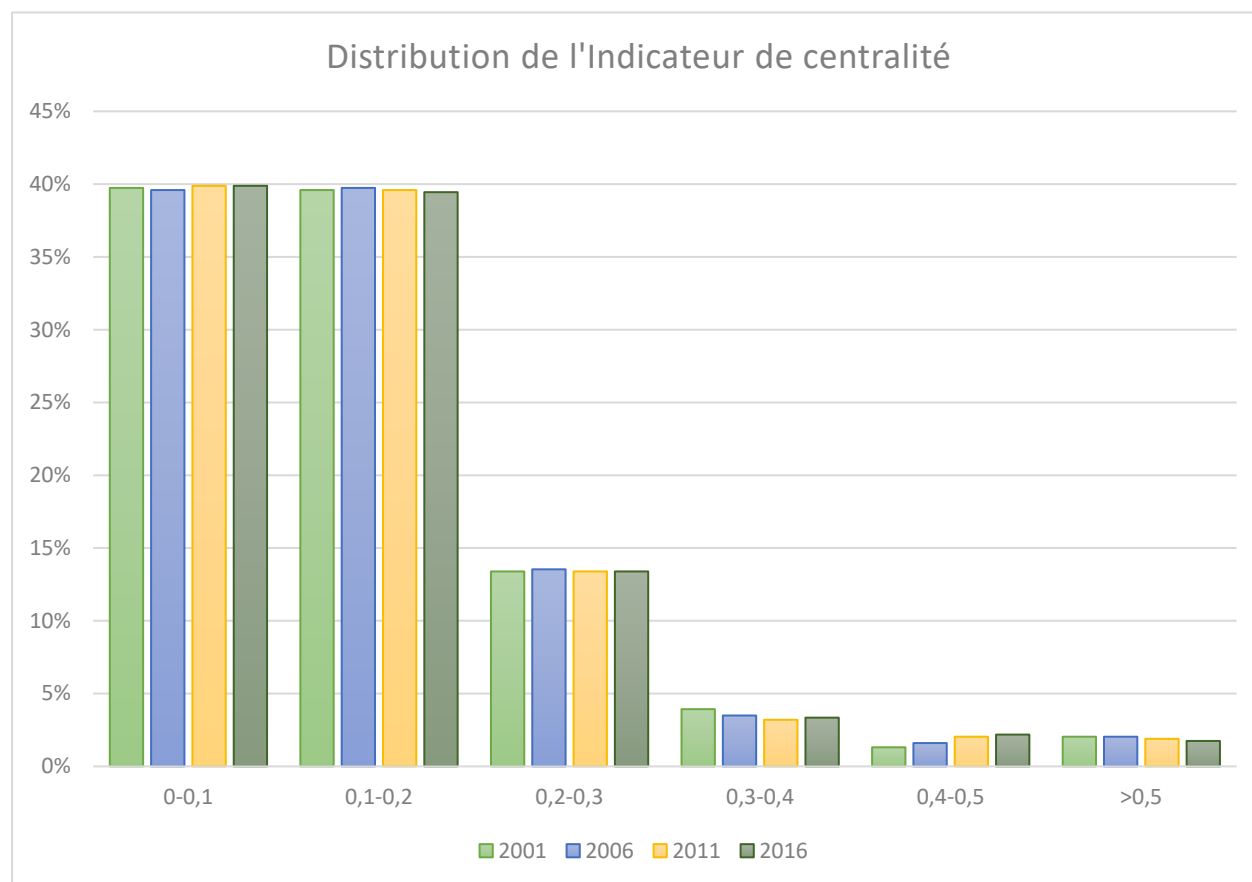


Figure 4.11 Distribution de l'indicateur de centralité

Ceci signifie qu'une importante partie du développement résidentiel ne se situe pas à proximité du centre-ville (que l'on représente ici par la position de l'Hôtel de Ville de Montréal). La Figure 4.12 confirme ce constat : on relève peu de secteurs ayant une valeur élevée (supérieure à 0,7) autour du centre-ville et plus généralement à l'intérieur de l'Île de Montréal, alors qu'au niveau de la Rive-Sud Proche, cet indicateur considère certains territoires comme centraux.

Indicateur de centralité

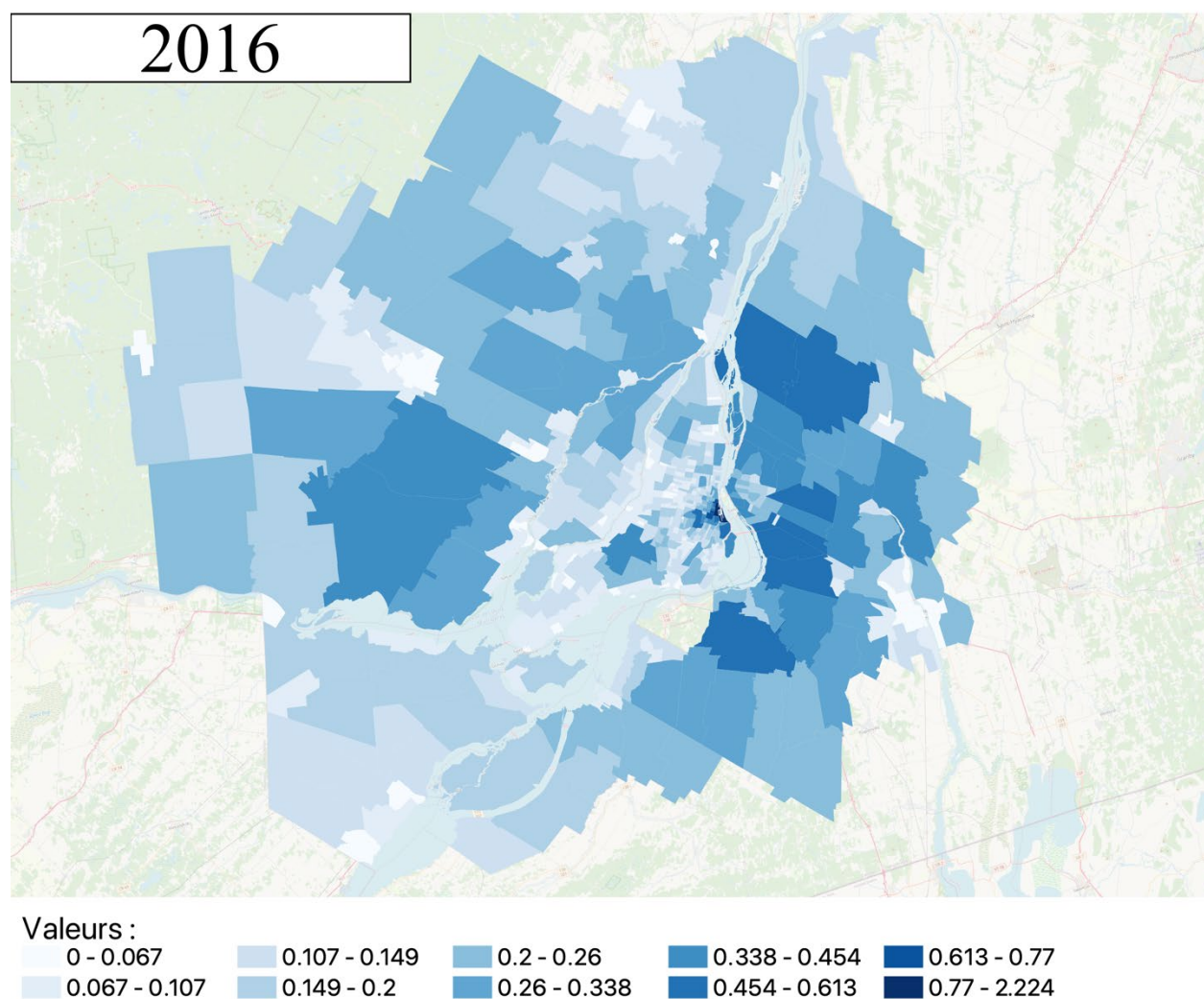
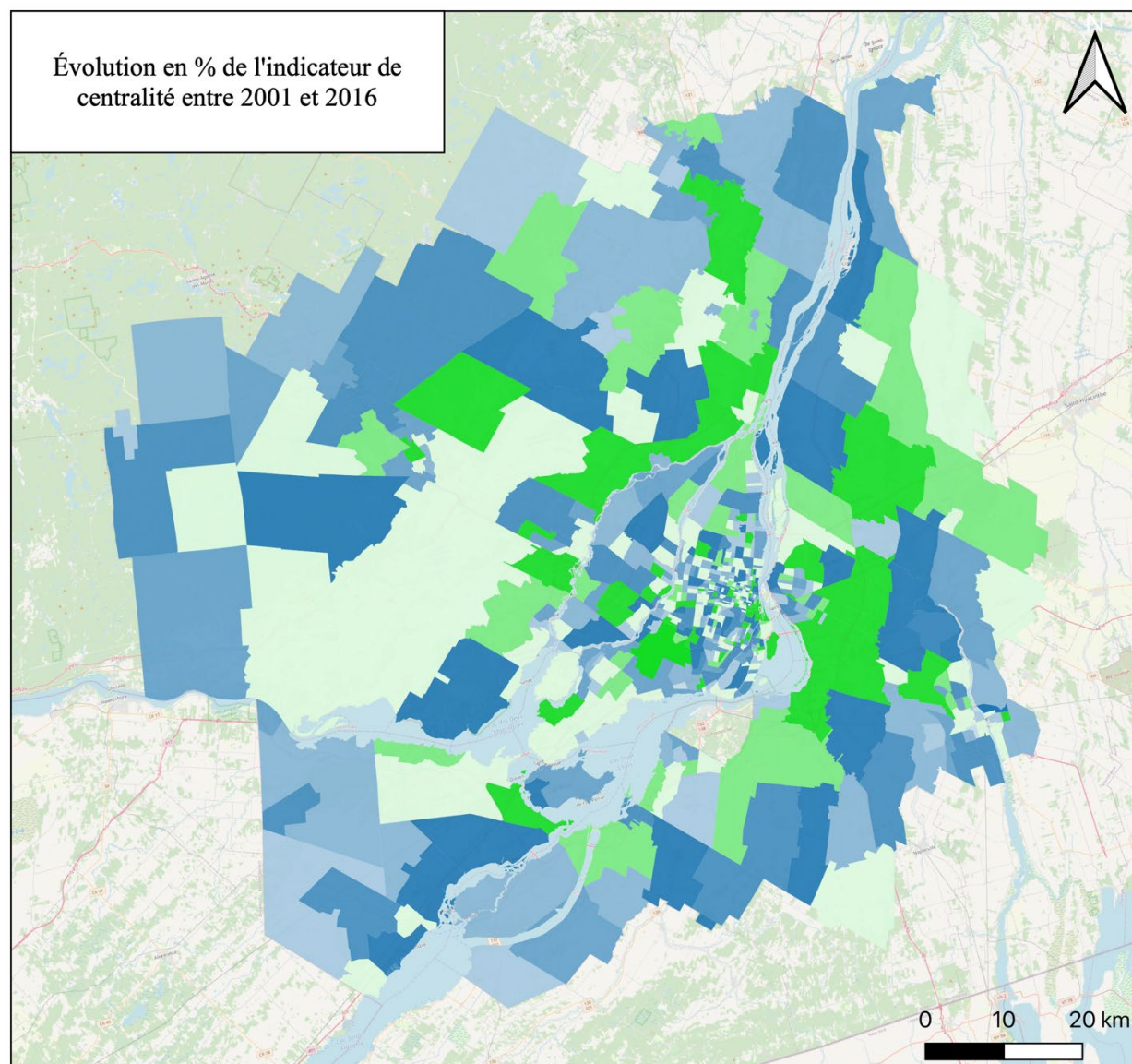


Figure 4.12 Valeurs de l'indicateur de centralité par secteur pour 2016

La Figure 4.13 représente l'évolution en % des valeurs de l'indicateur, on remarque que pour les zones de la Rive Sud Proche, et pour les secteurs situés à proximité des ponts, les valeurs ont observé une baisse (et donc une augmentation de l'étalement urbain). On peut alors s'attendre, à la lumière de ce constat, à observer un fort flux de déplacements entre ces secteurs et l'Île de Montréal et, par conséquent, à justifier le fort achalandage au niveau des ponts reliant ces territoires. Une illustration complémentaire des valeurs de cet indicateur pour chacune des années est en annexe Q.



Évolution en % :

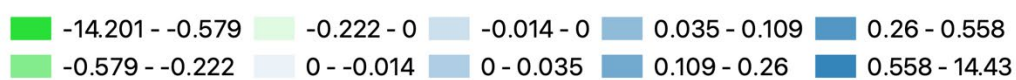


Figure 4.13 Évolution en % des valeurs de l'indicateur de centralité par secteur

4.1.6 Analyse de l'évolution du territoire

L'analyse précédente permet de mettre en lumière l'évolution et l'appartenance des territoires relativement à chaque indicateur, mais elle ne permet pas de créer une image plus simple à interpréter de l'évolution et de l'appartenance globale des secteurs. Et c'est là tout l'intérêt de cette section. L'objectif ici d'utiliser l'ensemble des valeurs des indicateurs sur l'ensemble des années afin de créer une typologie unique d'appartenance.

En attribuant pour chaque année la typologie d'appartenance du secteur, il est possible de retracer et d'observer plus aisément l'évolution complète du territoire analysé.

La Figure 4.14 représente les résultats obtenus de l'affectation des types de secteurs pour l'année 2016.

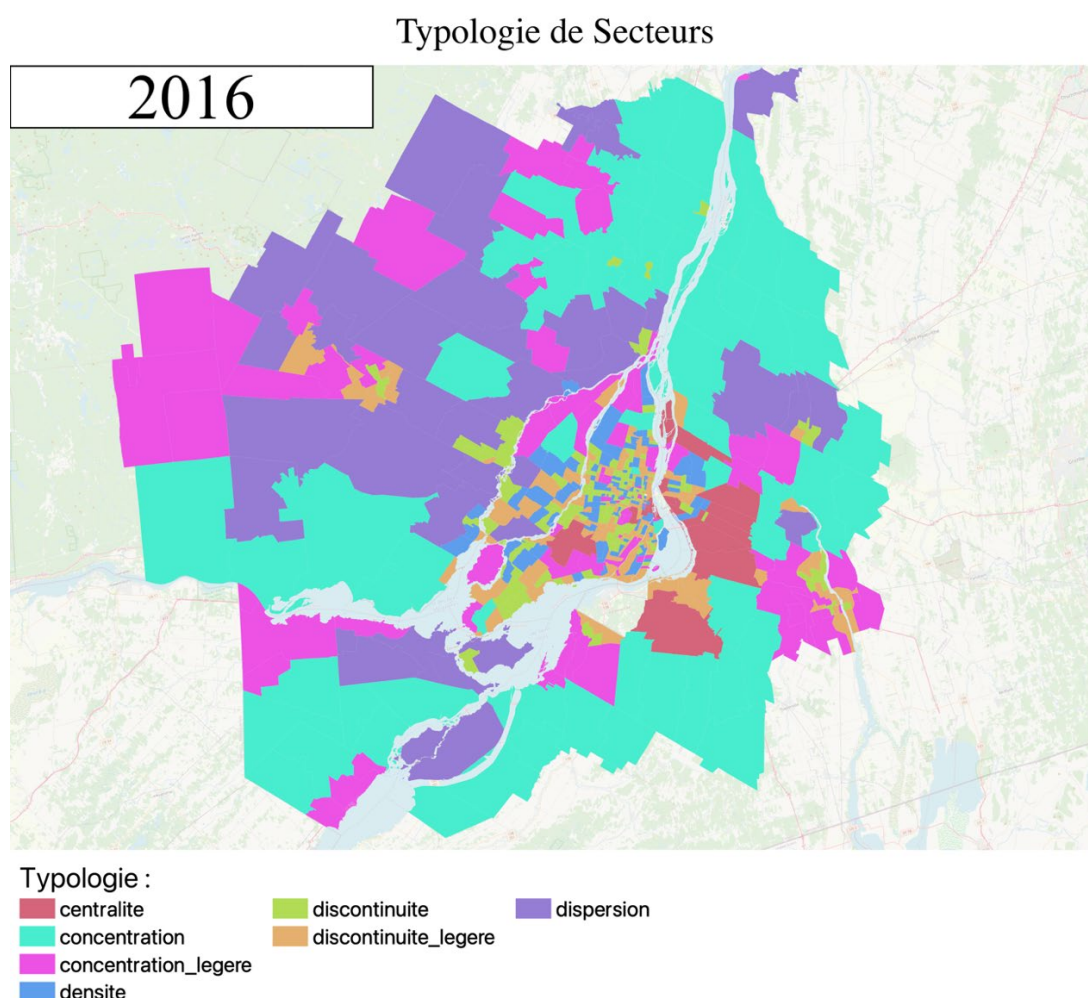


Figure 4.14 Typologie d'étalement urbain par secteur - 2016

En observant le positionnement des différents types de secteurs, on peut dresser les constats suivants. Les secteurs dispersés ont plus tendance à se situer dans la Couronne Nord et s'inscrivent dans un corridor orienté vers le nord de l'Île de Laval.

Les secteurs centraux sont disposés de manière radiale autour du centre-ville, avec une surface plus importante couverte au niveau de la Couronne Sud qu'à l'intérieur de l'Île de Montréal. Les secteurs plus denses se retrouvent naturellement à proximité immédiate du centre-ville de Montréal et autour des ponts reliant l'Île de Montréal à celle de Laval.

Les secteurs discontinus par contre sont assez éparpillés dans le territoire et suggèrent la présence de différents centres locaux autour desquels le développement s'est formé (absence de continuité de construction à l'intérieur du territoire). Il est intéressant de noter aussi qu'au niveau de la Couronne Nord, ce type de secteur se retrouve généralement à proximité immédiate des secteurs dits dispersés et localement concentrés.

La Figure 4.15 permet de visualiser les transformations subies par les secteurs pour chaque année référence. Le constat alarmant ici est qu'à travers les années, des secteurs de la Couronne Nord passent du statut légèrement concentré au statut dispersé. Cela démontre que le développement qui s'y effectue est conforme à l'une des définitions de l'étalement urbain, à savoir la construction de bâtiments résidentiels de faible densité (maisons unifamiliales par exemple) occupant de manière dispersée une grande partie de la surface au sol. Le reste du territoire semble subir peu de transformations alors qu'idéalement, il aurait été souhaitable de voir un développement plus axé sur la transformation et l'augmentation des densités résidentielles autour du centre-ville et des zones fortement desservies par le transport en commun.

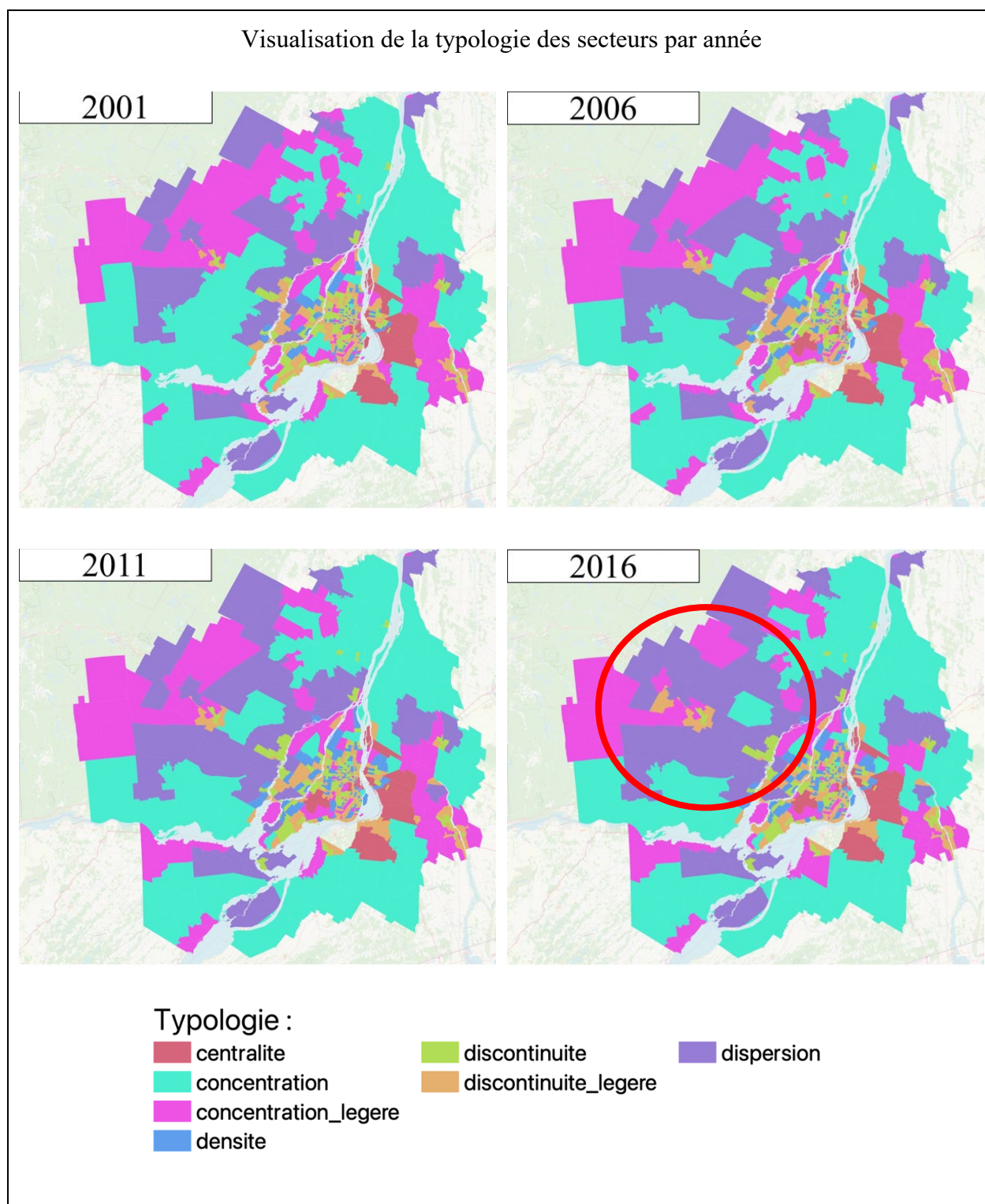


Figure 4.15 Évolutions de la typologie d'étalement urbain par secteur

Pour mieux observer les transformations des territoires, la Figure 4.16 retrace leur évolution à travers les années. L'évolution de chaque typologie y est présentée, l'épaisseur des lignes indique le nombre de secteurs et non la superficie couverte par le secteur. On remarque très peu de transformations à travers les années, mais il est tout de même intéressant de noter ce qui suit :

- Les secteurs légèrement concentrés se transforment en secteurs discontinus ou légèrement discontinus pour la plupart. Le secteur de recensement (4620850) situé à Chambly a en revanche été converti en secteur dispersé à partir de 2011. Il serait donc intéressant d'observer comment ce secteur a réagi face à l'évolution de capacité routière.
- Les secteurs qui se densifient semblent majoritairement passer par le stade de la discontinuité avant de devenir denses. Il est néanmoins alarmant de noter que le nombre de secteurs dispersés ne fait qu'augmenter en 15 ans et que quasiment aucun n'a évolué vers une typologie considérée comme moins étalée.

Les secteurs centraux quant à eux ne semblent pas subir de transformations notables non plus, si ce n'est que peu se densifient à travers les années.

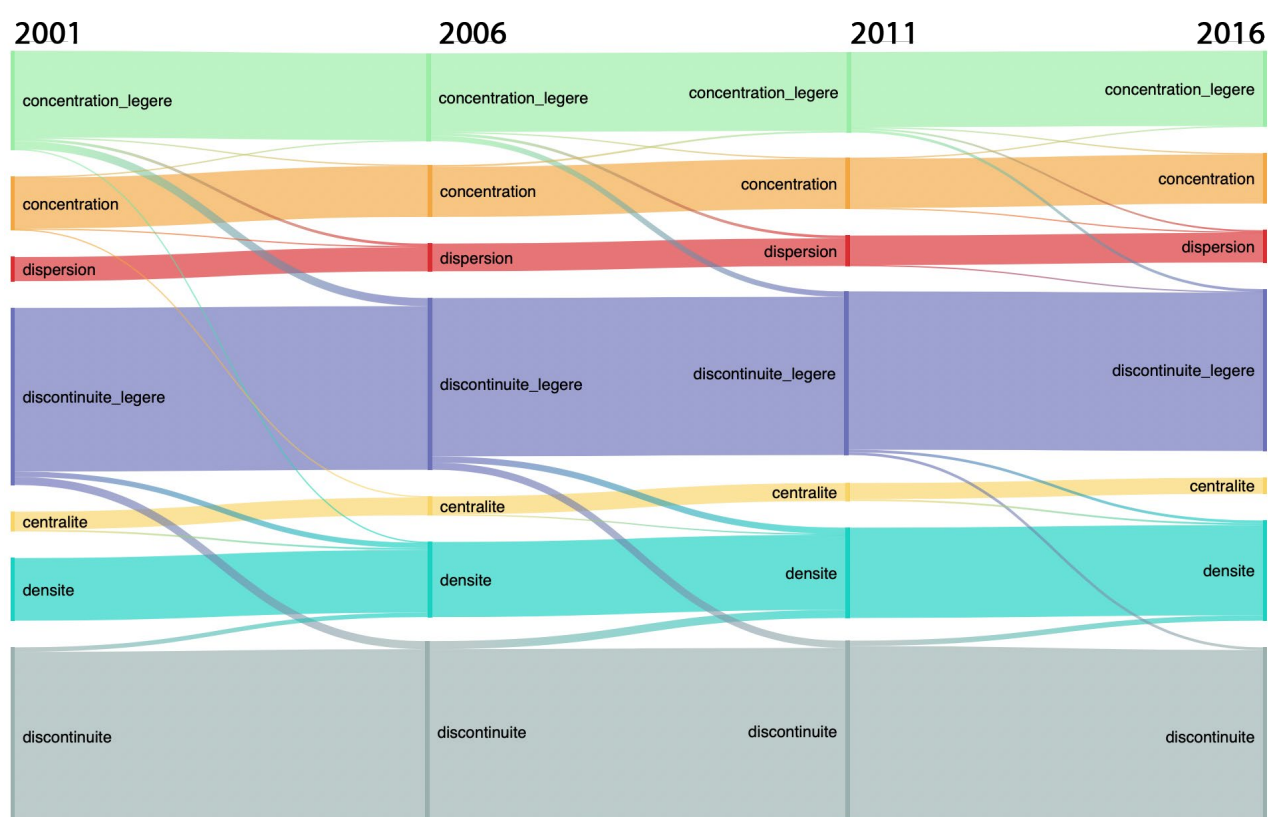


Figure 4.16 Diagrammes d'évolution des typologies d'étalement urbain

Le Tableau 4.1 représente la part occupée par chaque type et son évolution temporelle, l'analyse des pourcentages semble indiquer que la majorité des secteurs sont discontinus (29%) et que peu sont dispersés (4%), or ce constat correspond au nombre de secteurs de recensement appartenant à chaque type et non à la surface réelle occupée au niveau du territoire. L'analyse de la surface occupée par chaque type est abordée dans les sections qui suivent (Figure 4.42 pour plus de détails).

Tableau 4.1 Part occupée par type d'étalement urbain

Type	Part occupée par année (en %)			
	2001	2006	2011	2016
Centralité	3,2%	3,1%	2,9%	2,6%
Concentration	8,7%	8,4%	8,3%	8,2%
Concentration légère	16,2%	14,3%	13,1%	12,4%
Densité	10,2%	12,2%	14,7%	16,3%
Discontinuité	29,0%	29,5%	29,4%	29,0%
Discontinuité légère	28,8%	27,9%	26,6%	26,3%
Dispersion	3,9%	4,5%	4,9%	5,2%

La Figure 4.17 brosse un constat de l'évolution des parts de chaque type d'étalement urbain. Les secteurs denses et dispersés semblent voir leur part augmenter plus rapidement que le reste des secteurs. Les secteurs discontinus et légèrement discontinus observent une baisse alors que les secteurs concentrés ou centraux maintiennent leur part occupée inchangée. Là encore ce constat s'intéresse au nombre de secteurs et non à la part (en superficie) occupée au niveau du territoire.

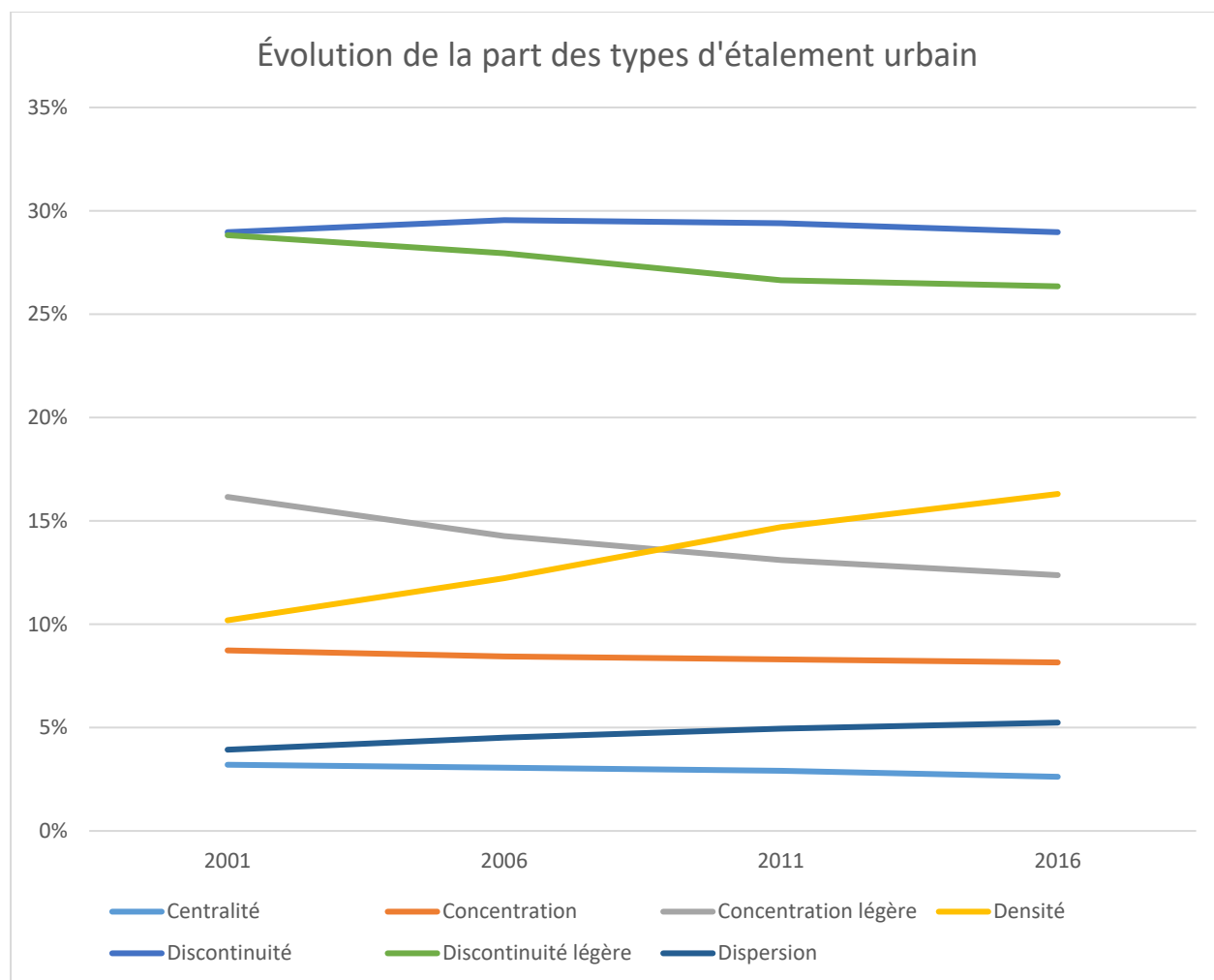
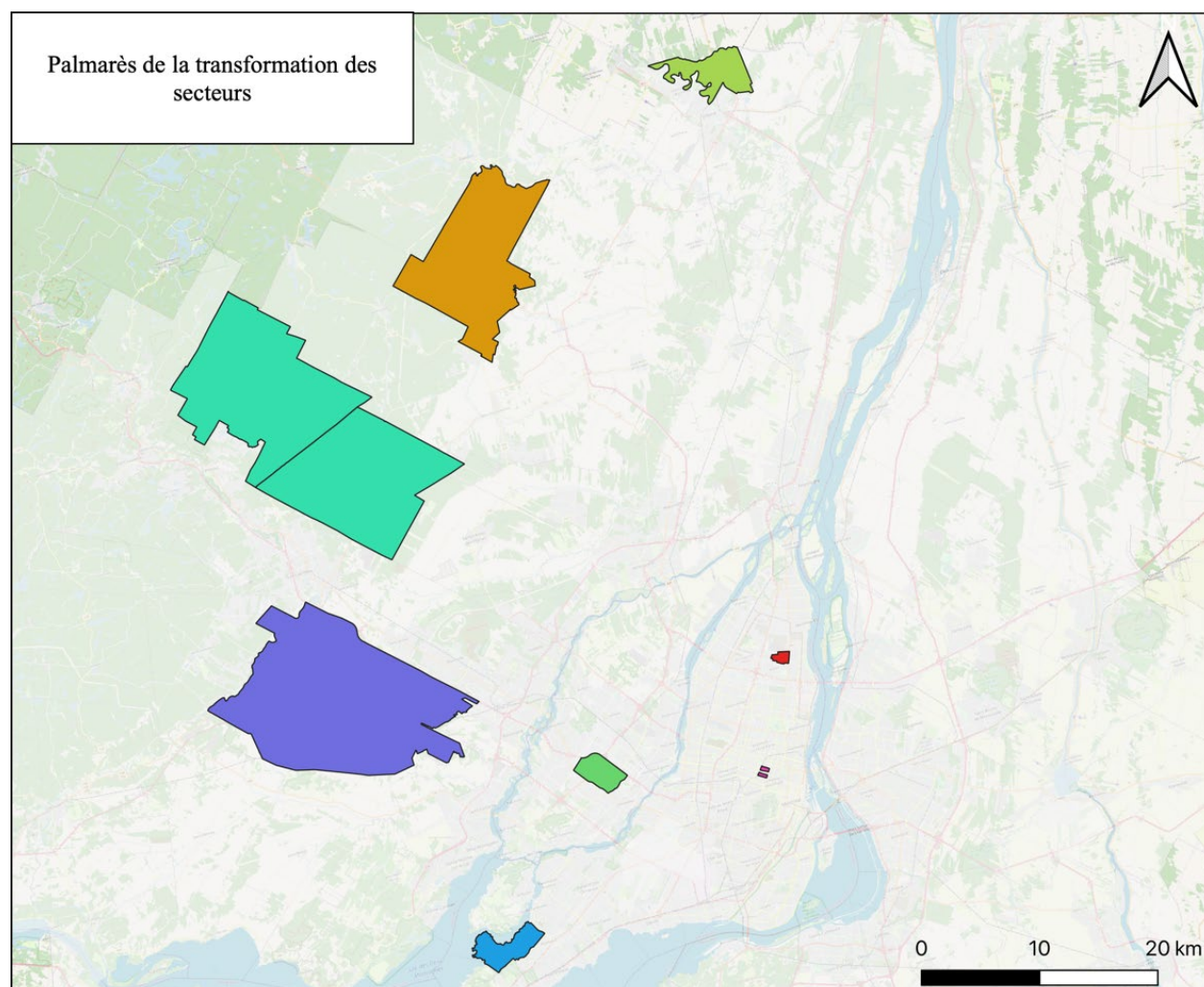


Figure 4.17 Évolution des parts occupées par type d'étalement urbain

Le Tableau 4.2 reprend un palmarès des 10 secteurs ayant connu les plus importantes transformations entre 2001 et 2016. Les secteurs sont identifiés dans la Figure 4.18. Le classement est réalisé en tenant compte du nombre de changements de type observés entre les années cibles. Pour les 5 secteurs ayant connu une transformation uniquement, le choix s'est porté sur ceux ayant évolué vers un type dispersé. Pour les 5 premiers secteurs du classement, il ressort que trois se sont densifiés et que deux sont passés d'une concentration légère à une discontinuité. On notera également l'impact de la finesse du découpage qui, pour deux secteurs de recensement du Plateau Mont-Royal, se traduit par une évolution différente: un secteur se densifie alors que le second devient discontinu. Les secteurs ayant connu une dispersion marquée sont tous situés en couronne nord; ce constat vient donc appuyer les observations précédentes et confirme que la couronne nord est le territoire subissant le plus d'étalement urbain.



Secteurs

- | | |
|---|--|
| Crabtree, Joliette, Notre-Dame-des-Prairies, St-Charles-Borromée, St-Paul, St-Pierre, St-Thomas | Montréal : Mercier |
| Laval : Chomedey | Montréal : Pierrefonds |
| Mirabel | Montréal : Plateau Mont-Royal |
| | Saint-Roch-de-l'Achigan, Saint-Roch-Ouest, Saint-Lin-Laurentides, Saint-Calixte, Sainte-Julienne |
| | Sainte-Sophie, Prévost, Saint-Hippolyte |

Figure 4.18 Palmarès de la transformation des secteurs

Tableau 4.2 Palmarès de la transformation des secteurs

Numéro de secteur	Type				Nom du secteur	Nombre de changements
	2001	2006	2011	2016		
4620172	discontinuité légère	discontinuité	densité	densité	Montréal : Plateau Mont-Royal	2
4620174	concentration légère	discontinuité légère	discontinuité	discontinuité	Montréal : Plateau Mont-Royal	2
4620194	discontinuité légère	discontinuité légère	discontinuité	densité	Montréal : Mercier	2
4620515	concentration légère	dispersion	dispersion	discontinuité légère	Montréal : Pierrefonds	2
4620643	concentration légère	discontinuité légère	discontinuité légère	densité	Laval : Chomedey	2
2461030	concentration légère	dispersion	dispersion	dispersion	Crabtree, Joliette, Notre-Dame-des-Prairies, St-Charles-Borromée, St-Paul, St-Pierre, St-Thomas	1
2463060	concentration légère	concentration légère	dispersion	dispersion	Saint-Roch-de-l'Achigan, Saint-Roch-Ouest, Saint-Lin-Laurentides, Saint-Calixte, Sainte-Julienne	1
2475028	concentration légère	dispersion	dispersion	dispersion	Sainte-Sophie, Prévost, Saint-Hippolyte	1
2475045	concentration légère	concentration légère	concentration légère	dispersion	Sainte-Sophie, Prévost, Saint-Hippolyte	1
4620734	concentration	dispersion	dispersion	dispersion	Mirabel	1

Le constat global à tirer de cette analyse est donc que le territoire souffre de plus en plus du phénomène d'étalement urbain à travers les années et que le développement a tendance à se faire de manière dispersée au niveau de la Couronne Nord, sans que le reste du territoire ne subissent de majeures transformations. Il serait intéressant d'explorer, pour une analyse future, les profils de croissance sociodémographiques des résidents de ces secteurs, puis de considérer de manière chronologique les politiques de développement urbain adoptées pour mieux comprendre les causes expliquant ce schéma d'évolution.

4.2 Analyse de l'offre

L'analyse de l'offre se fera grâce aux résultats obtenus du traitement des fichiers Canvec, comme évoqué dans le chapitre 3 (méthodologie). Seules les données pour les années 2009 et 2015 ont pu être exploitées, cela constitue tout de même un pas de 5 ans qu'il sera possible de mettre en perspective avec l'évolution de l'étalement urbain.

On utilisera le réseau historique reconstitué comme base pour l'analyse qui suit.

La première variable explorée est intuitivement la longueur du réseau routier. La Figure 4.19 dresse l'état de la longueur du réseau par classe de segment routier. On remarque qu'un changement de classe s'est effectué entre 2009 et 2015, des segments routiers codés en route locale en 2009 ont certainement changé de classe en 2015 et n'ont pas été détruits comme pourrait le suggérer ce graphique.

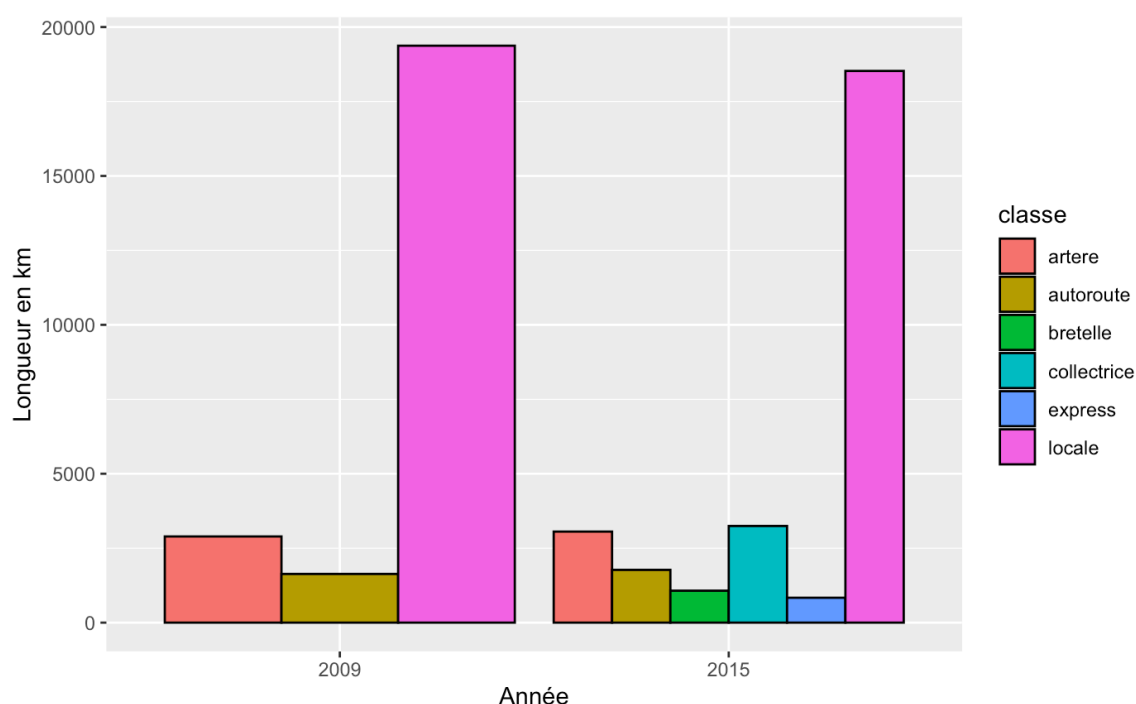


Figure 4.19 Classification du réseau historique Canvec

Pour éviter tout biais d'analyse que causerait cet enjeu, ces segments routiers seront exclus de l'analyse, on se concentrera sur le réseau routier supérieur.

Pour chaque secteur, le calcul des VKT offerts par km² a été réalisé (détails des calculs en chapitre 3) pour les années 2009 et 2015. Il a été possible d'en tirer un pourcentage d'évolution entre les deux années :

$$\% \text{ d'évolution des } VKT_{offerts} = \left(\frac{VKT \text{ par km}^2 \text{ offerts en 2015}}{VKT \text{ par km}^2 \text{ offerts en 2009}} - 1 \right) \times 100$$

La Figure 4.18 ci-après présente cette variable pour chaque secteur. Un premier constat est que cette évolution ne semble pas à première vue se faire uniquement à proximité du centre-ville, mais dépend fortement du tracé autoroutier. On observe, au niveau des couronnes, des secteurs ayant une évolution supérieure à 40% tout en étant entourés de secteurs ayant un plus faible taux d'évolution.

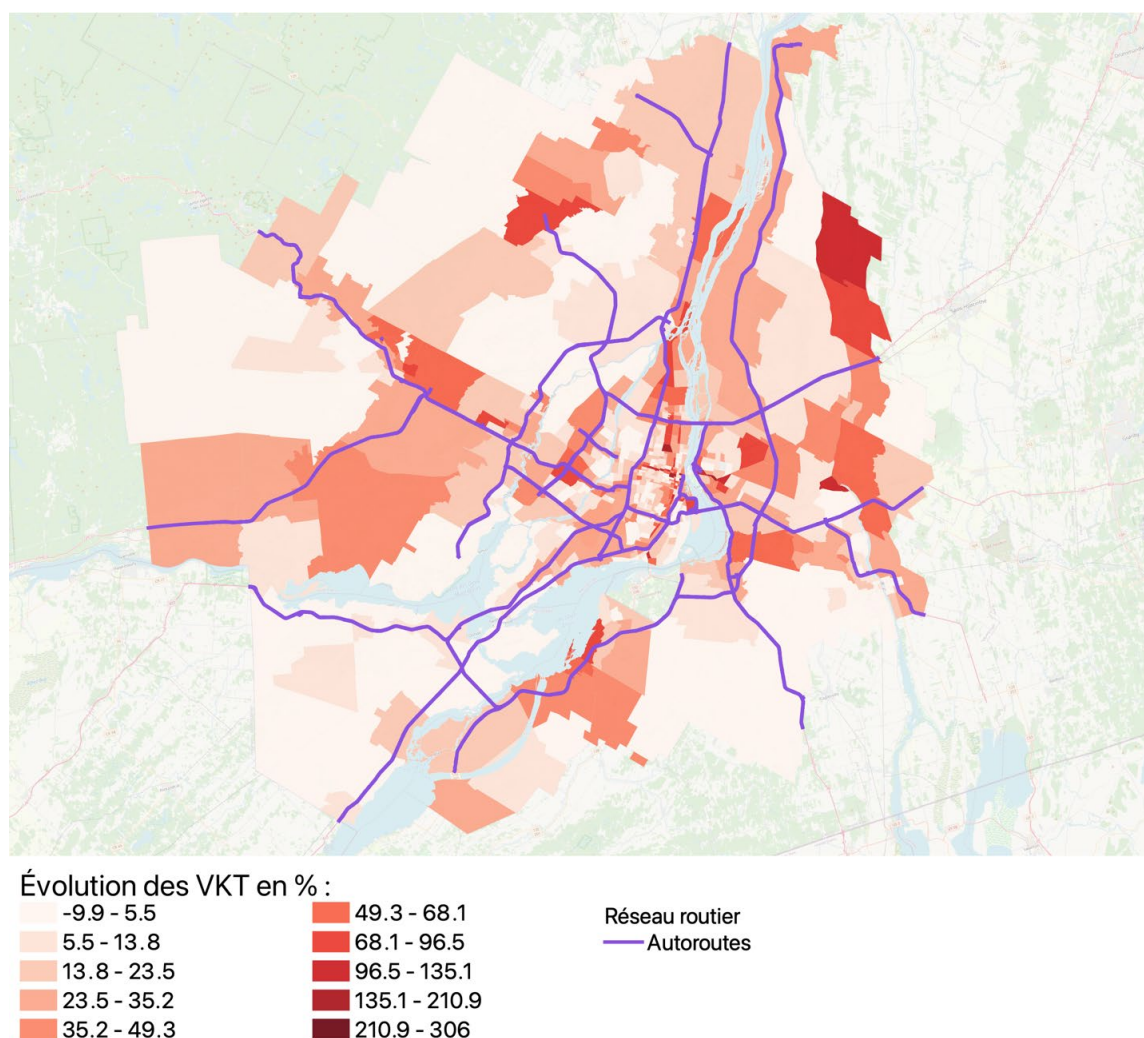


Figure 4.20 Évolution des VKT offerts par secteur

Il est à rappeler ici que l'analyse se fait au niveau de l'infrastructure routière. Le taux d'occupation des véhicules n'a pas d'impact sur ce constat puisque les VKT offerts garderont la même valeur si les résidents du secteur utilisent du covoiturage pour leurs déplacements.

Il serait intéressant, à la vue de ce constat, d'analyser comment cette évolution s'est faite par rapport à la population et à la typologie d'étalement urbain. La Figure 4.19 en fait état. On remarque que par rapport à la ligne médiane (ligne représentée en rouge), plusieurs secteurs se situent à droite, cela signifie que pour ces secteurs, les VKT offerts ont évolué plus rapidement que la population, et ce pour un pas de 5 ans seulement.

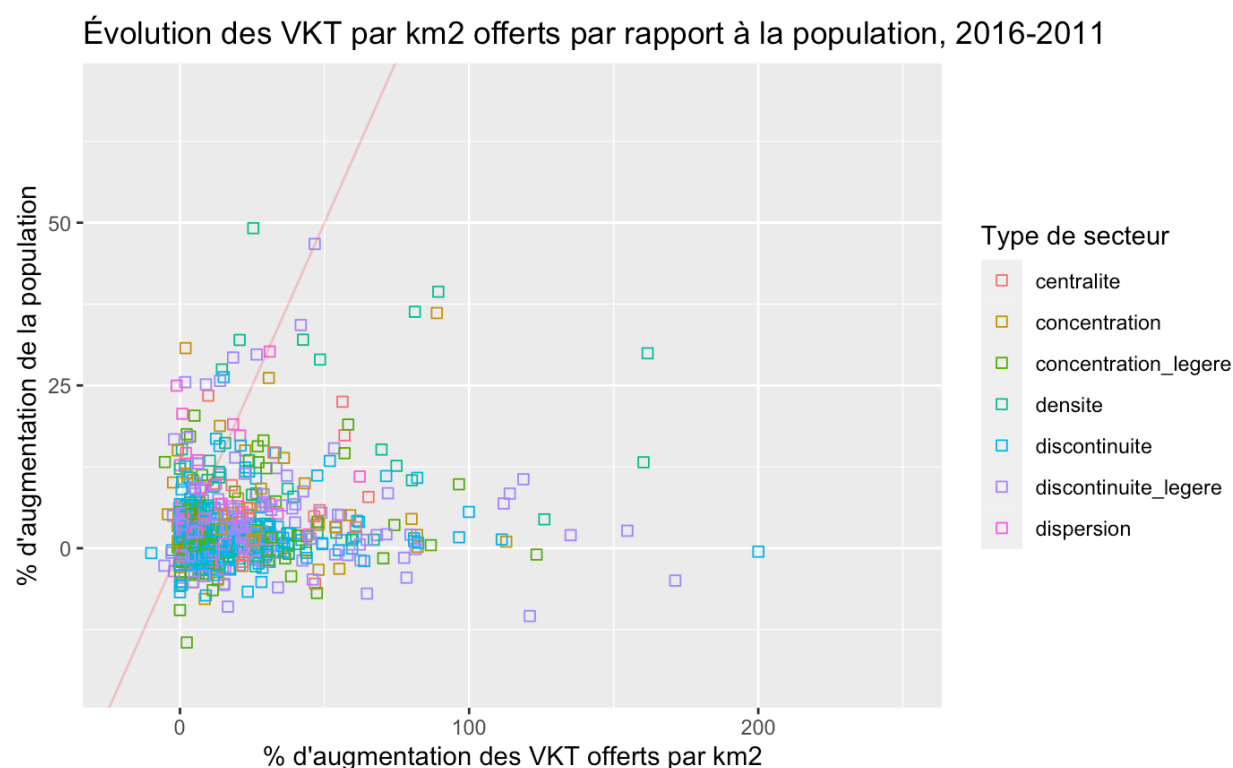


Figure 4.21 Comparatif de l'évolution de la densité des VKT offerts par rapport à la population

On s'intéressera plus en détail à l'impact de l'appartenance à un des types de la typologie d'étalement urbain lors de l'analyse croisée.

Si l'on explore le même graphique, mais en nous intéressant cette fois uniquement à la longueur du réseau, on obtient la Figure 4.20. L'évolution semble plus contenue, mais l'on comprend ici l'importance d'une approche par capacités. S'intéresser aux capacités permet de visualiser plus

clairement l'évolution de l'offre routière offerte aux résidents d'un secteur tout en séparant les secteurs ayant subi de réelles transformations des autres secteurs.

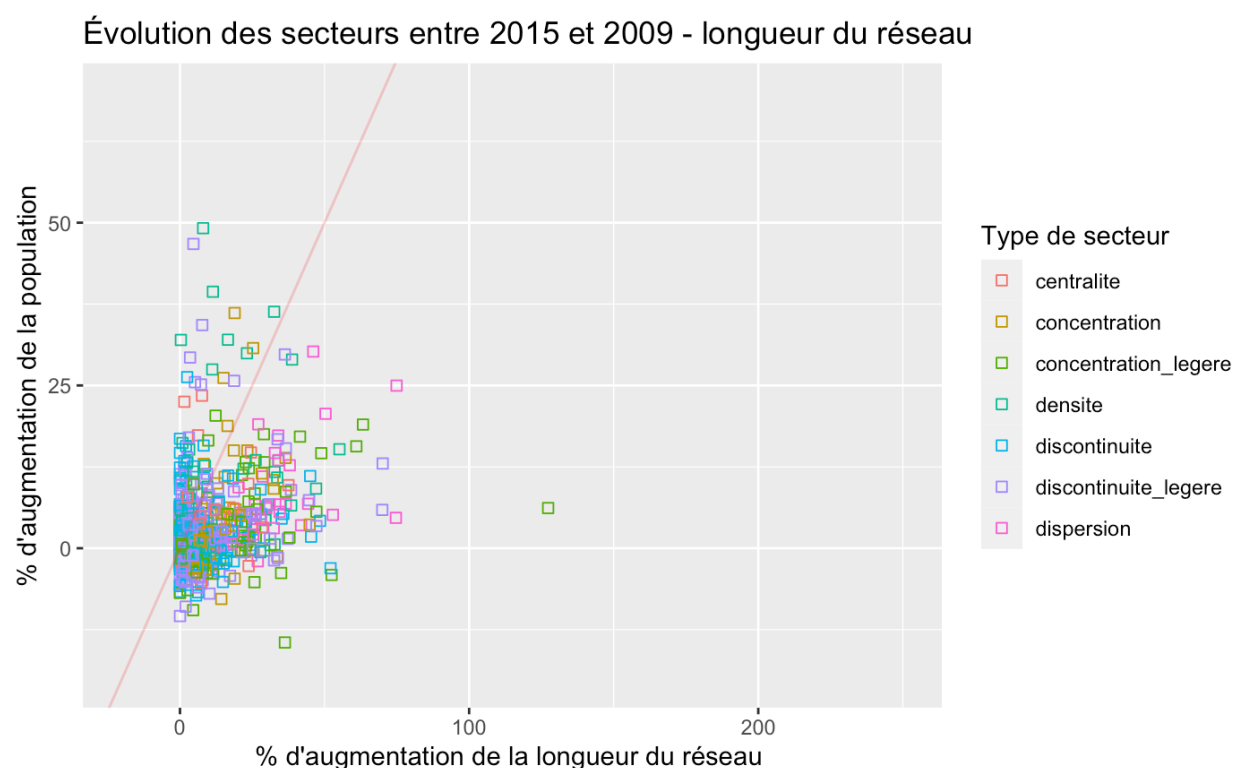


Figure 4.22 Comparatif de l'évolution de la longueur du réseau par rapport à la population

Afin de permettre une analyse future plus axée sur des secteurs au cas par cas, des fiches pour chaque secteur ont là aussi été générées. Les fiches reprennent un visuel du secteur analysé en listant les réseaux Canvec de 2009 et 2015, puis une vue élargie permet de repérer le secteur dans le territoire. Des statistiques sur la population, la surface et la composition du réseau sont également incluses. Leur lecture permet d'établir un constat plus précis pour tout utilisateur ayant un intérêt pour un secteur particulier. La Figure 4.22 et la Figure 4.22 sont un exemple d'une fiche générée.

Fiche du Secteur 4620421

Emplacement :



Statistiques :

La surface du secteur est de 0.97 Km²
 La longueur du réseau en 2009 est de 18.72 Km
 La longueur du réseau en 2015 est de 19.91 Km
 La longueur du réseau a augmenté de 6.38 %
 La Population a augmenté de 3.6 %

Population :



Positionnement dans le territoire OD :

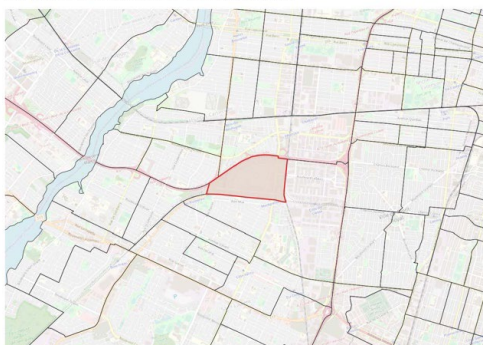
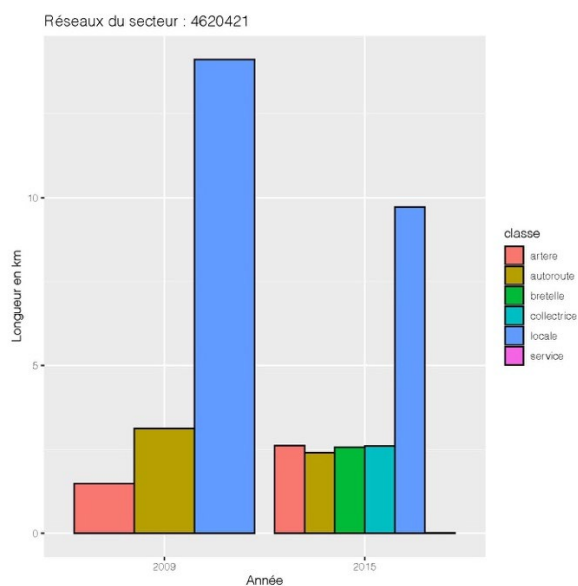
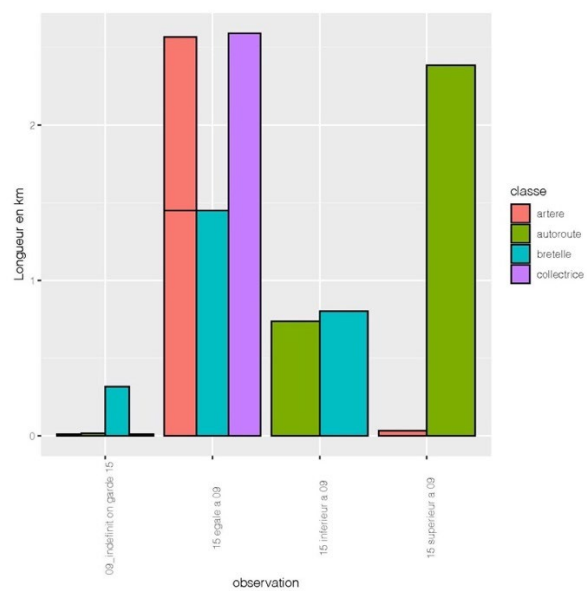


Figure 4.23 Exemple d'une fiche pour un secteur - réseau Canvec - statistiques

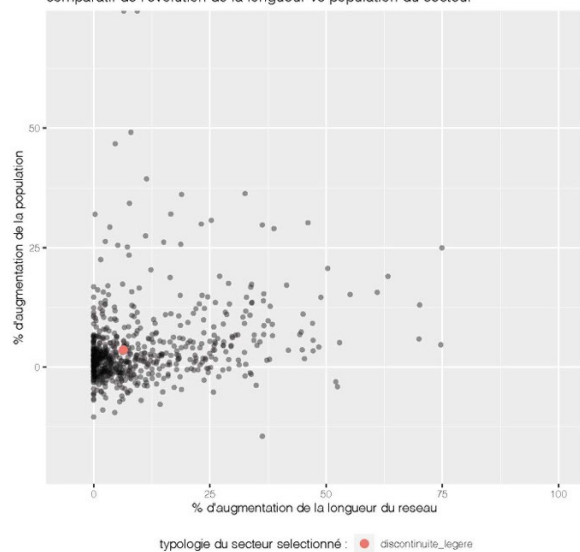
composition du réseau :



analyse du nombre de voies:



comparatif de l'évolution de la longueur vs population du secteur



comparatif de l'évolution des VKT offerts vs population du secteur

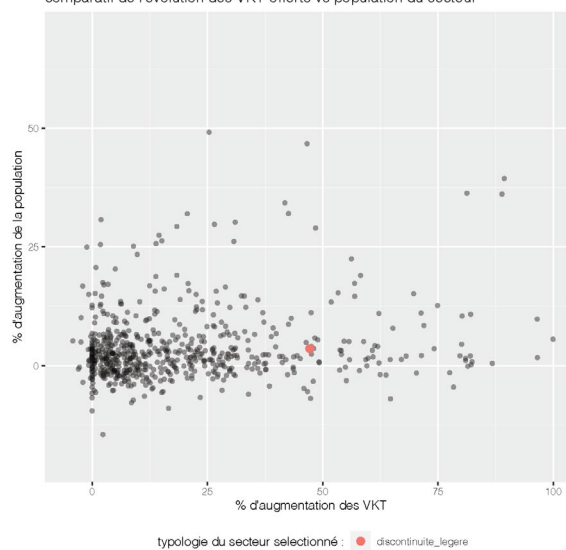


Figure 4.24 Exemple d'une fiche pour un secteur - réseau Canvec

4.3 Analyse de la demande

Comme évoqué dans le chapitre 3, l'analyse de la demande sera principalement axée sur l'évolution des VKT consommés par les résidents du territoire d'une part et l'évolution des VKT consommés par tous les résidents d'un secteur. Une analyse descriptive permettra de mieux visualiser les distributions des variables d'intérêt dans un premier temps, puis un modèle de régression permettra d'expliquer une partie de la variabilité observée au niveau de la demande.

4.3.1 Analyse des VKT consommés

En utilisant les données de l'enquête OD, il est possible de déterminer les VKT consommés par les résidents de chaque secteur. Pour obtenir des résultats comparables, les VKT consommés par personne (résident) seront notre variable d'intérêt.

Pour l'année 2016, la variable a la distribution présentée à la Figure 4.23.

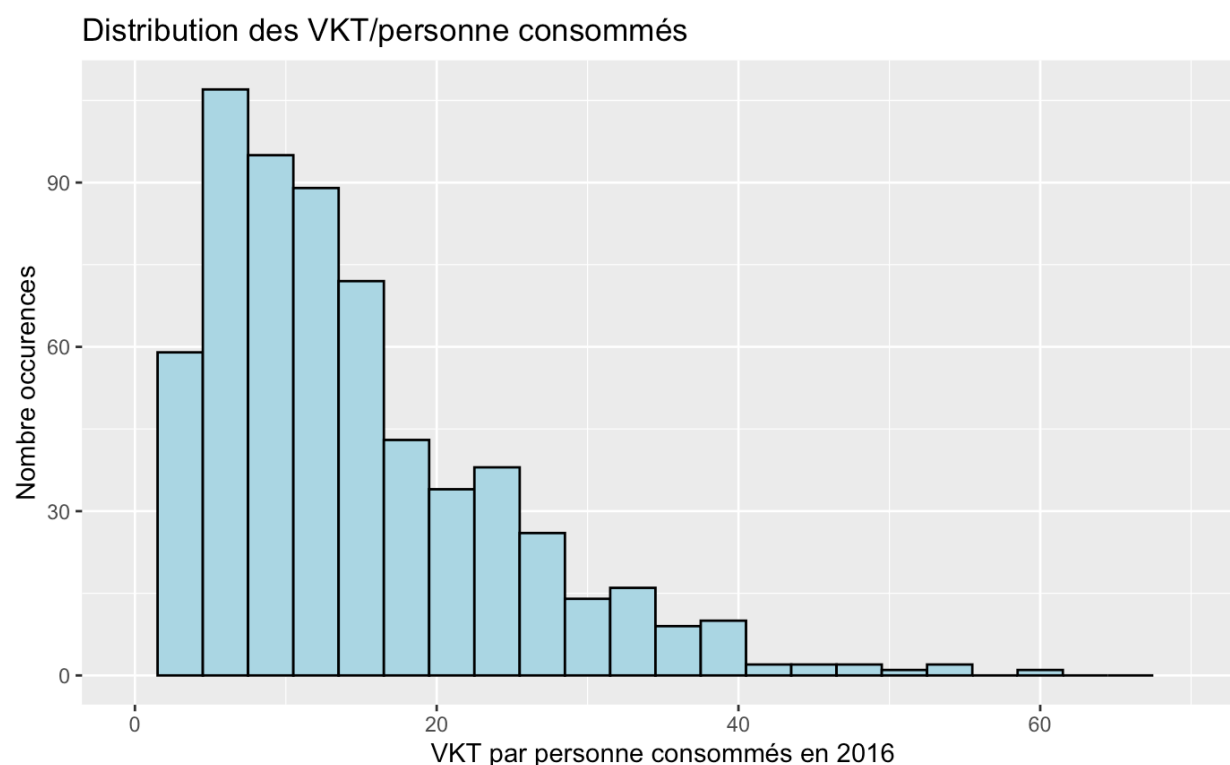


Figure 4.25 Distribution des VKT consommés par personne

Un pic est atteint pour environ 8 km/ personne parcourus en auto comme conducteur, tous secteurs confondus. En nous intéressant de plus près à la distribution géographique des VKT consommés

par personne, on obtient la Figure 4.24. Il est clairement visible que plus on s'éloigne du centre-ville de Montréal et plus la consommation de VKT est élevée. Une hypothèse serait que les secteurs en couronnes jouent le rôle de secteurs abritant une population qui transite régulièrement vers des régions plus rapprochées du centre-ville.

VKT par personne consommés en 2016

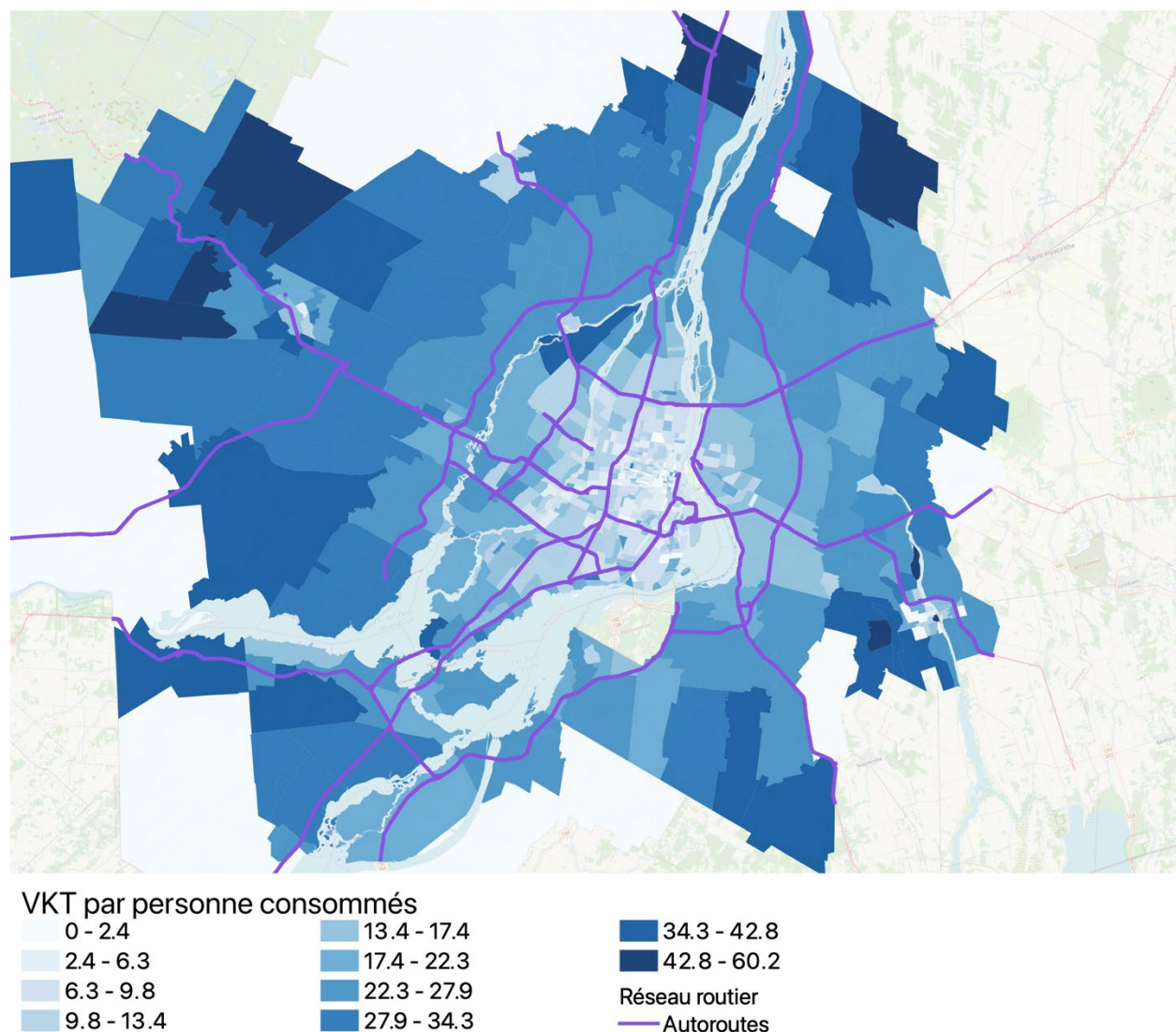


Figure 4.26 Répartition des VKT consommés par personne en 2016

L'évolution entre nos années de référence (Annexe Z) permet de remarquer sans grande surprise qu'au fil des années, les résidents des secteurs éloignés du centre-ville consomment de plus en plus

de VKT, notamment ceux habitant des secteurs longeant, ou à proximité immédiate, du réseau autoroutier en Couronne Nord.

Il est bon de noter ici que les secteurs ayant peu/pas de répondants (moins de 7) ont été exclus, et ce pour l'ensemble des années. L'objectif est de ne pas fausser les observations et analyses qui en découlent.

Il est également intéressant de nous intéresser de plus près à l'évolution observée entre 2011 et 2016; cela permettra par la suite de la mettre en perspective en regard de l'évolution de la capacité routière et de l'étalement urbain pour ces mêmes années.

La Figure 4.28 représente le % d'évolution des VKT consommés. Fait intéressant, des secteurs ont vu leur consommation de VKT baisser entre 2016 et 2011. Une partie de ces secteurs est située au centre-ville, mais d'autres se retrouvent également en Couronne Sud. Une interprétation serait que ces secteurs sont, ou se situent, à proximité de secteurs localement concentrés. Il se pourrait donc que leur développement permette la création de services plus proches des résidents et contribue donc à diminuer les kilomètres parcourus en auto. Cette hypothèse nécessiterait d'être validée en analysant de plus près certaines variables tel que la démographie, les motifs, distances et nombre de déplacements effectués par les résidents par exemple.

Évolution des VKT consommés 2016-2011

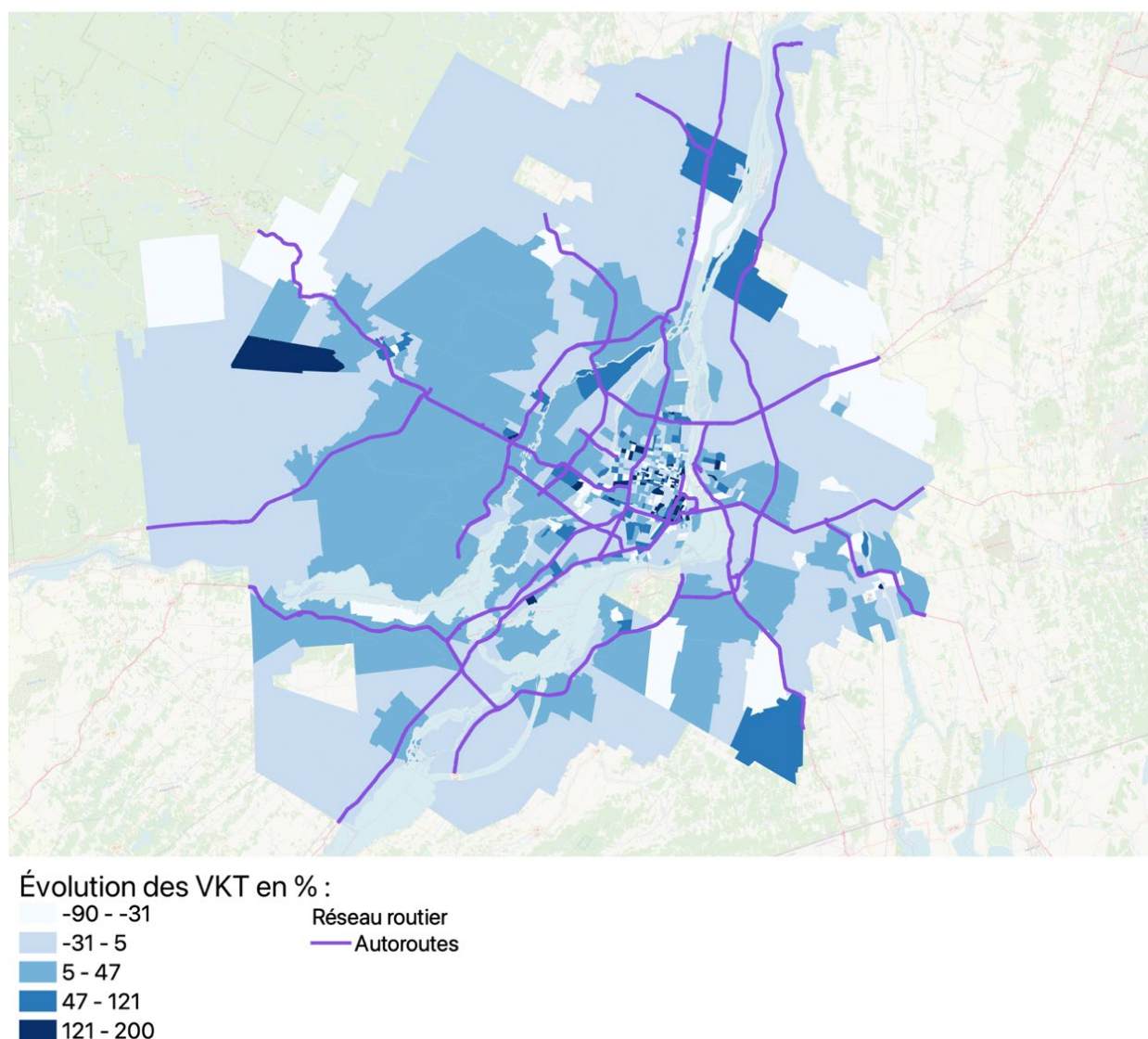


Figure 4.27 Évolution des VKT consommés entre 2011 et 2016

On soupçonne également un effet lié au découpage assez fin du territoire. Un SR ayant observé une baisse des VKT consommés/personne pourrait s'expliquer simplement par la différence d'affectation des répondants (résidents) de l'enquête OD, en effet, la pondération des données de l'enquête OD se fait pour reconstituer la population des secteurs municipaux (SM). Le fait que la population se retrouve spatialement dispersée entre SR peut entraîner une divergence au sein de SR appartenant à un même SM.

Pour nous assurer de l'absence d'un enjeu lié à la finesse du découpage pour cette variable, ce même calcul a été mené pour un découpage en secteurs municipaux et pour une évolution brute des VKT (et non des VKT/personne). Les valeurs sont obtenues par agrégation des valeurs d'un SR appartenant à chaque SM. Le résultat est illustré par la Figure 4.27 qui confirme bien qu'en Couronne Sud, une baisse a été observée au niveau de la demande en transport.

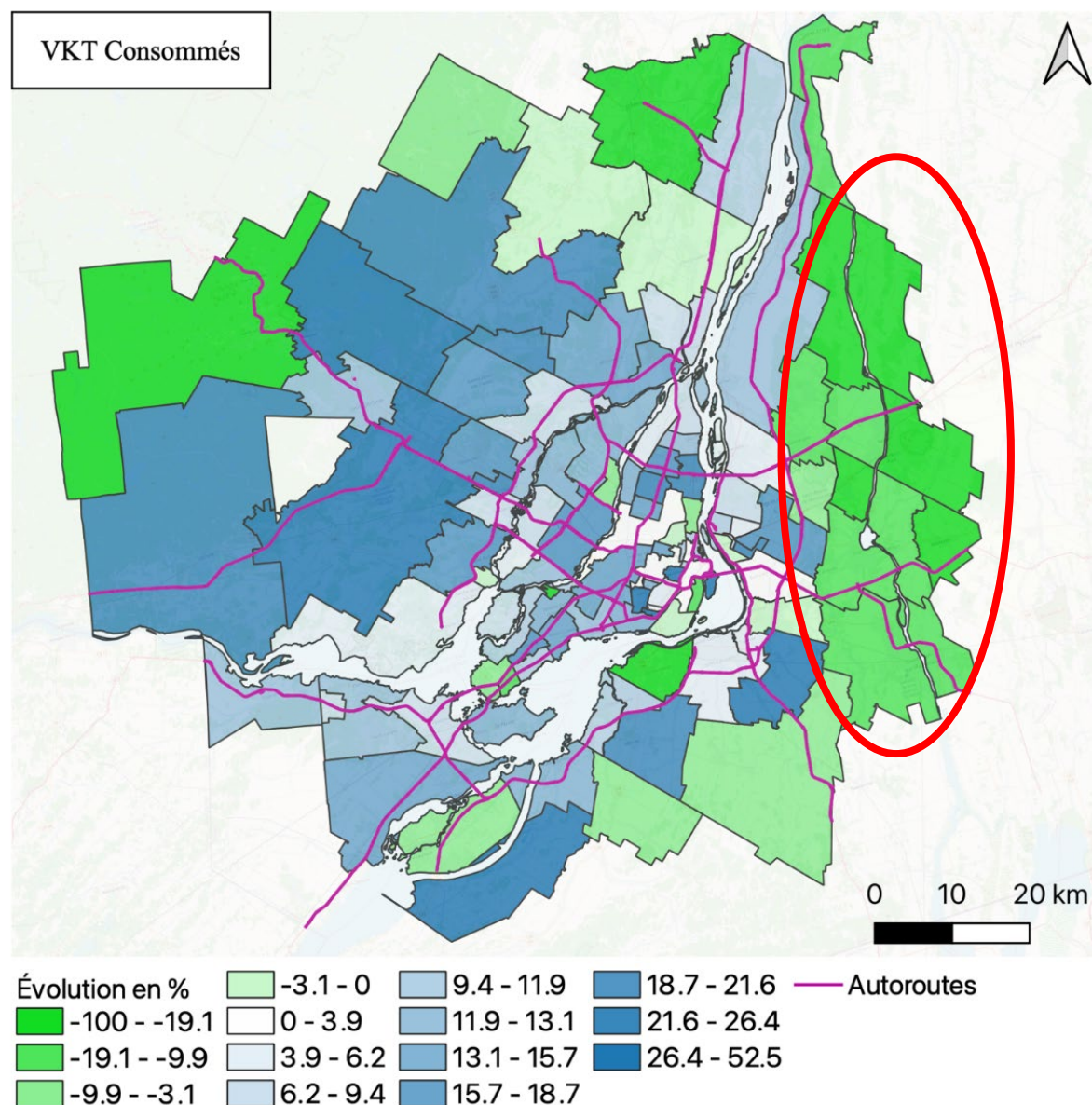


Figure 4.28 Évolution des VKT en % entre 2016 et 2011 - Secteurs municipaux

Pour essayer de clarifier les causes derrière cette baisse, on s'intéresse à l'évolution de la part des non-mobiles, à l'évolution de la population, de la population adulte et des travailleurs à temps plein dans ce territoire.

La Figure 4.28 fait état de l'évolution observée en % pour ces variables. On observe que la population augmente en général au niveau de la Couronne Sud, y compris la population adulte, mais on observe en parallèle une baisse des travailleurs à temps plein et une augmentation de la part des non-mobiles.

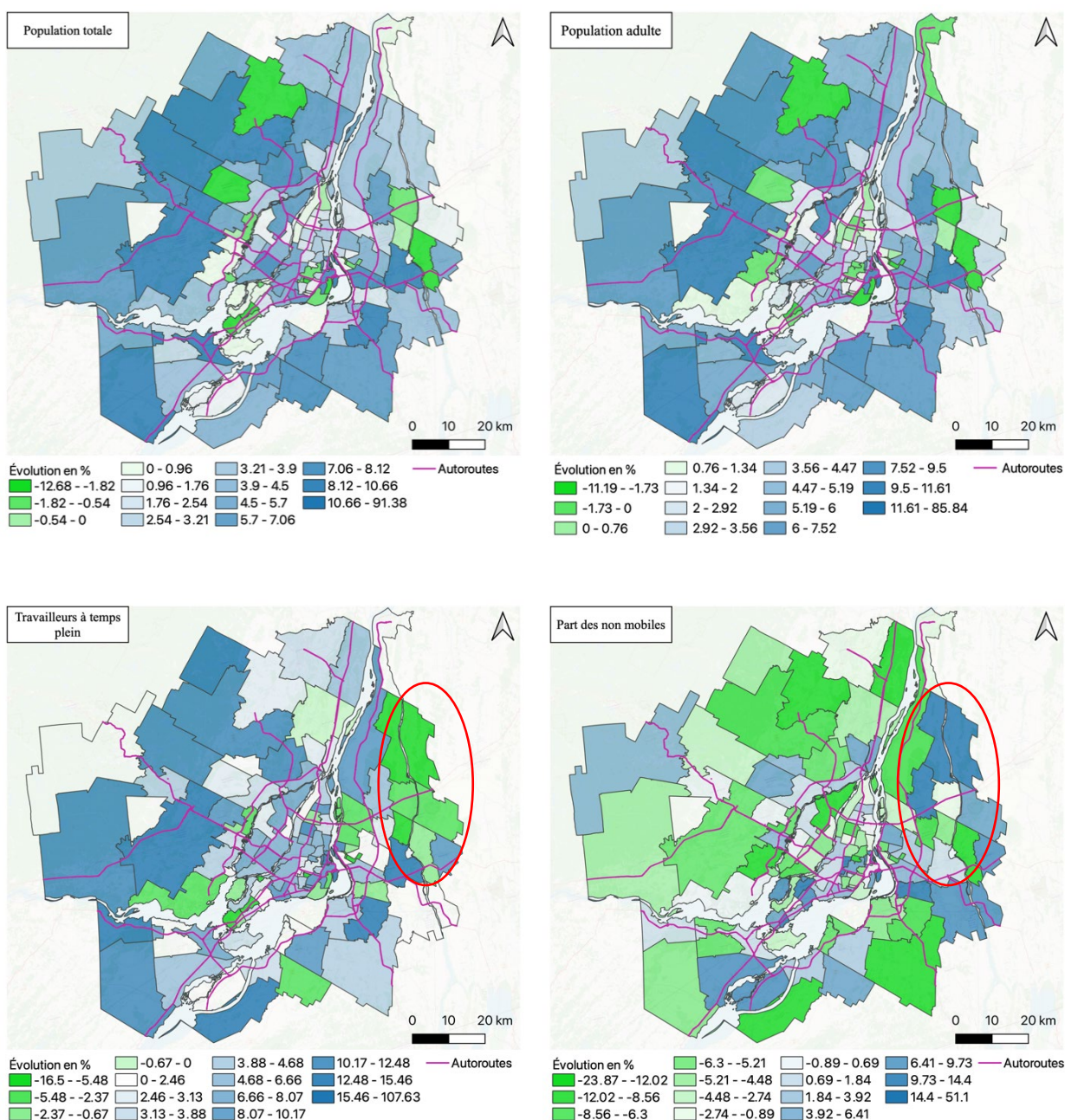


Figure 4.29 Évolution des variables de population et part des non-mobiles par SM - 2011 à 2016

Ce constat suggère donc une explication possible à la baisse observée des VKT: la baisse serait liée à l'effet combiné de l'augmentation de la part des non-mobiles et la baisse des travailleurs à temps plein résidant dans ces secteurs. L'effet lié au découpage en SR est limité vu que cette vérification a été menée sur un découpage en secteurs municipaux, écartant de ce fait l'effet de l'affectation des répondants à des secteurs de résolution plus fine.

En mettant en perspective l'évolution des VKT consommés et l'évolution de la population, on obtient la Figure 4.29. La forme de ce nuage de point démontre que pour certains types de secteurs, la consommation de VKT par personne augmente plus rapidement que la population (la ligne rouge représentant la médiane séparant le graphique en deux).

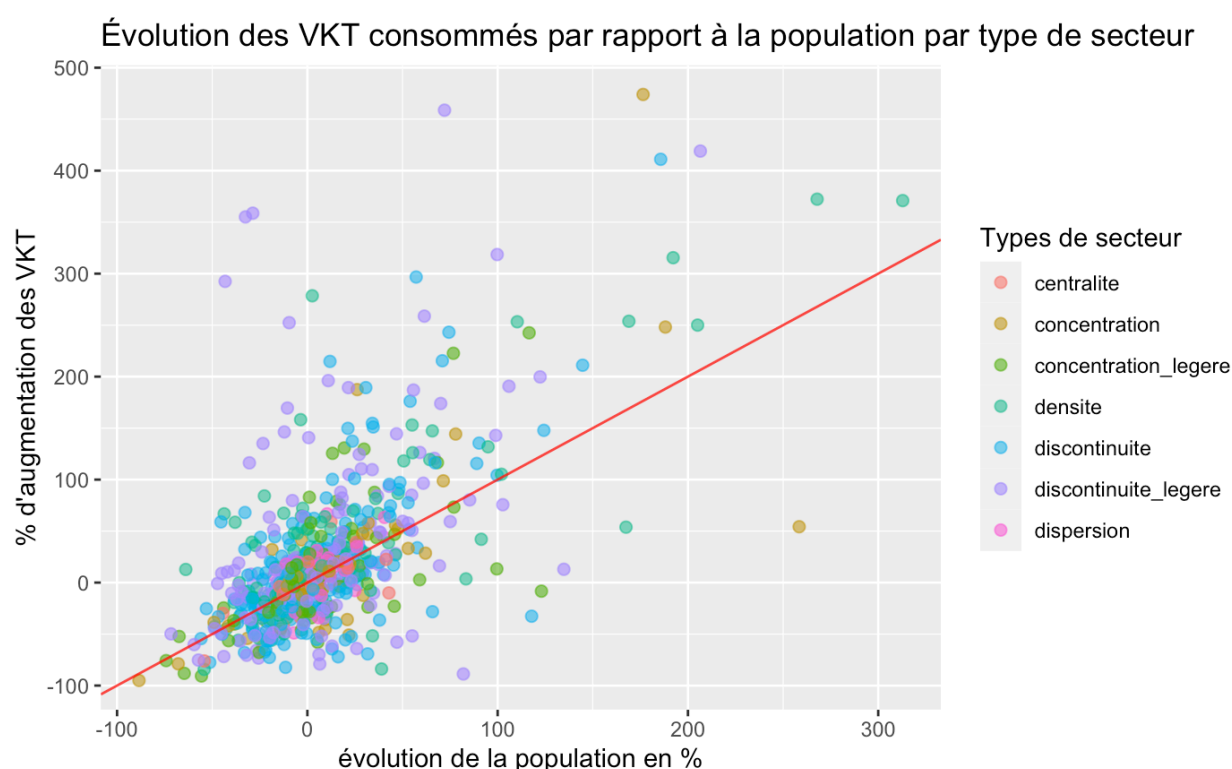


Figure 4.30 Comparatif de l'évolution des VKT par rapport à l'évolution de la population

Les secteurs discontinus, légèrement discontinus et légèrement concentrés se démarquent facilement au vu de l'extrême augmentation des VKT qu'ils observent, mais on remarque tout de même une grande concentration de points dans l'intervalle $[-50, 50\%]$. Il demeure **difficile** de séparer le comportement des secteurs à l'intérieur de cet intervalle et c'est là tout l'intérêt de l'analyse croisée qui suivra.

4.3.2 Modèle explicatif

Mais avant de nous intéresser à l'analyse croisée, il serait utile de réaliser un dernier constat statique - pour une année - de l'impact des variables d'étalement urbain, d'offre routière et de démographie sur les VKT consommés.

L'objectif n'est pas d'analyser l'évolution, mais simplement de clarifier si l'appartenance à un secteur ayant des caractéristiques données (population, étalement urbain, réseau routier) a un impact sur la consommation en VKT des résidents.

Pour ce faire, le modèle de régression évoqué dans le chapitre précédent sera appliqué aux données d'une année : 2016.

Pour rappel, le modèle de régression retenu se présente comme suit :

$$VKT_{personne} \sim Densité_{population} + \sum_{typologies} I_{étalement} + rte_{voie} + auto_{voie} + revenu + essence$$

Avec :

- $VKT_{personne} = \frac{\text{Nombre de VKT consommés par les résidents du secteur}}{\text{Population du secteur}}$
- $Densité_{population} = \frac{\text{Population du secteur}}{\text{superficie du secteur}}$
- $I_{étalement} = \text{variable binaire (0 ou 1)}$ caractérisant l'appartenance d'un secteur à un type d'étalement urbain. lorsque le secteur est de type "dispersion" par exemple, alors $I_{dispersion} = 1$ et le reste des $I_{étalement} = 0$
- $auto_{voie} = \frac{\text{Longueur du réseau autoroutier} \times \text{nombre de voies}}{\text{superficie du secteur}}$
- $rte_{voie} = \frac{\text{Longueur du réseau routier autre que les autoroutes}}{\text{superficie du secteur}}$
- $revenu = \text{revenu median d'une personne habitant le secteur}$
- $essence = \text{prix moyen annuel de l'essence au niveau de la région d'appartenance du secteur}$

Le choix des VKT par personne, pour cette analyse uniquement, se justifie par le fait que l'objectif est de comparer l'impact des variables dépendantes sur le comportement des résidents, il ne s'agit pas d'une analyse de l'évolution de la consommation de VKT.

La variable représentant la densité de population a été préférée à la population brute pour éviter un effet de masse, le territoire est en effet découpé en zones de différentes tailles, utiliser la population totale ne permet pas une comparaison correcte entre secteurs.

Deux autres variables ont également été explorées, mais ne seront pas incluses dans le modèle vu la présence de corrélation (corrélation détaillée plus bas) :

$$\text{densité de batiments} = \frac{\text{nombre de batiments d'un secteur}}{\text{Surface du secteur en km}^2}$$

$$\text{densité de logements} = \frac{\text{nombre de logements d'un secteur}}{\text{Surface du secteur en km}^2}$$

Le Tableau 4.3 liste quelques statistiques sur les variables explorées.

Tableau 4.3 Statistiques des variables du modèle de régression

Variable	minimum	maximum	moyenne	médiane	1er Quantile	3e Quantile
VKT par personne	1	929	16	12	7	19
Densité de population	0	40869	5839	4241	1206	9232
Revenu	12992	435586	52606	34020	27968	51584
rte_{voie}	1	70	24	27	14	35
$auto_{voie}$	0	22,9	0,9	0	0	0,8
Densité de bâtiments	1	9281	1297	1020	363	1892
Densité de logements	0	17869	1921	1163	401	2597
Essence	100	110	103	104	103	104

Après vérification de la forme des variables, une analyse de corrélation permet de les inclure sans risquer d'avoir une forte corrélation. La Figure 4.30 reprend les corrélations en dressant simultanément un constat visuel des distributions (au niveau de la diagonale) et un nuage de points (XY) pour deux variables (partie sous la diagonale). Les valeurs au-dessus de la diagonale représentent les coefficients de corrélation pour chaque paire de variables.

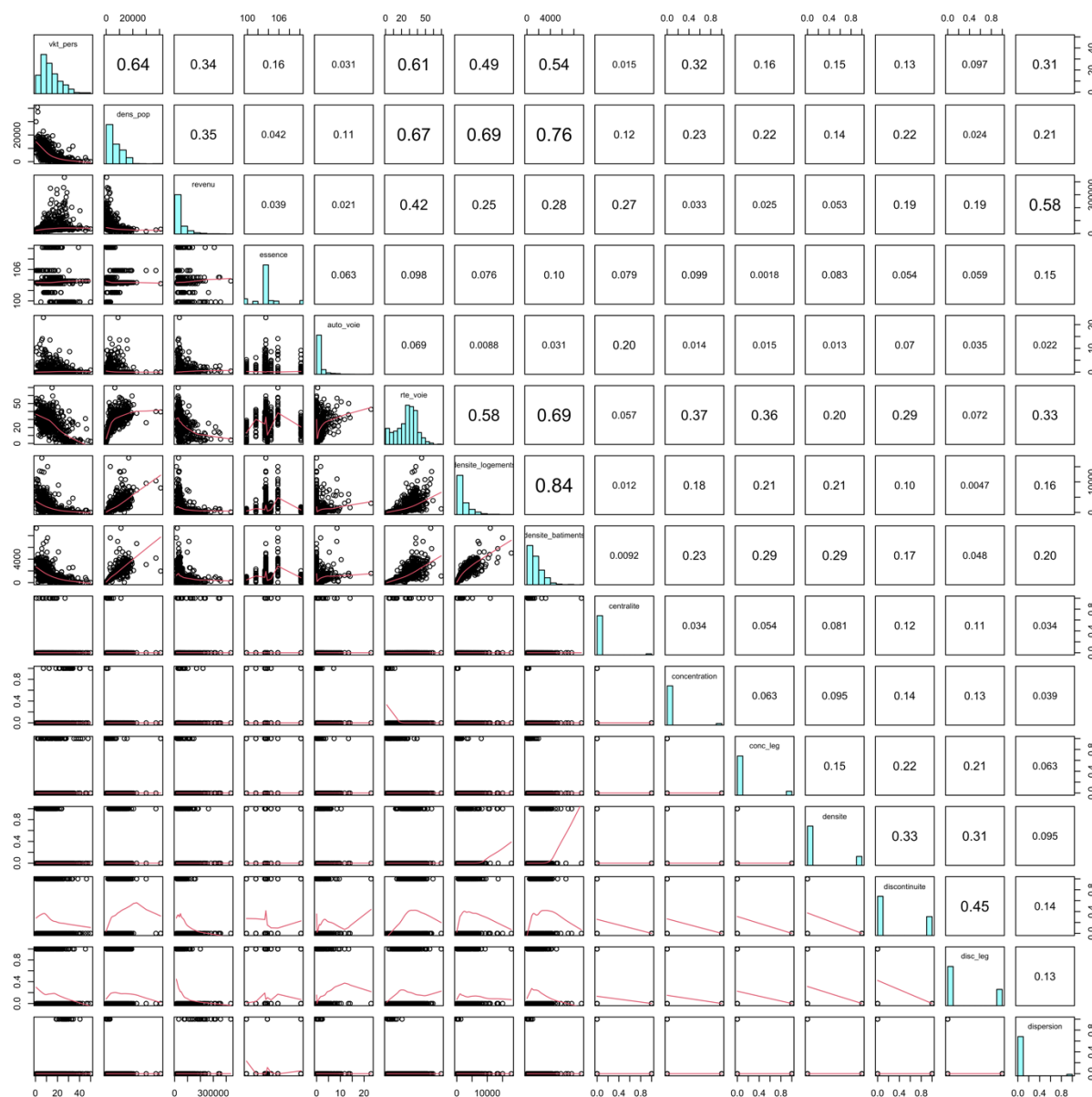


Figure 4.31 Corrélations entre variables du modèle de régression

La variable rte_{voie} présente une corrélation avec la densité de population, mais il nous semble pertinent de la considérer dans le modèle. Ne garder que la variable caractérisant le réseau autoroutier risque de ne pas aboutir à des résultats significatifs (plusieurs secteurs ne sont pas traversés par des autoroutes), un test VIF (facteur d'inflation de la variance) a été mené pour s'assurer que le maintien de cette variable n'influence pas les autres facteurs. Le Tableau 4.2 liste les résultats du test VIF. Les facteurs n'étant pas élevés, le choix de garder cette variable est justifié.

Tableau 4.4 Résultats du test VIF

Densité de population	rte_{voie}	$auto_{voie}$	Essence	Revenu
1,93	2,92	1,10	1,05	2,08

Les coefficients du modèle de régression sont représentés par le Tableau 4.3. La valeur du R^2 ajustée est de : 0.50, les variables significatives retenues permettent donc d'expliquer 50% de la variabilité des VKT consommés par personne et par secteur. Il est intéressant de constater que l'ensemble des indicateurs (sous leur forme binaire) sont significatifs, cela signifie donc que l'étalement urbain a bien un impact sur la demande en transport.

Vu que les indicateurs listés sont de forme binaire et qu'ils sont tous significatifs, il est possible de comparer leur coefficient pour comparer l'impact sur la consommation en VKT des résidents. Par rapport à un secteur central, les résidents des secteurs concentrés réalisent en moyenne 9,9 km de plus pour leur déplacement, suivis des résidents des secteurs dispersés puis discontinus pour environ 8,7 et 4,7 km respectivement.

Tableau 4.5 Coefficients du modèle de régression

Coefficients	Valeur	Erreur type	T value	P-value	Significativité ¹
(Moyenne)	5,05E+01	1,27E+01	3,985	7,59E-05	***
Densité de population	-6,99E-04	6,34E-05	-11,016	2,00E-16	***
Concentration	9,87E+00	2,18E+00	4,516	7,60E-06	***
Concentration légère	3,76E+00	1,89E+00	1,991	0,04689	*
Densité	3,48E+00	1,72E+00	2,02	0,0438	*
Discontinuité	4,68E+00	1,73E+00	2,712	0,00689	**
Discontinuité légère	3,50E+00	1,72E+00	2,033	0,04254	*
Dispersion	8,67E+00	2,10E+00	4,131	4,12E-05	***
<i>rte_{voie}</i>	-1,55E-01	3,47E-02	-4,478	9,05E-06	***
<i>auto_{voie}</i>	-1,48E-01	1,18E-01	-1,26	0,20804	
Essence	-3,17E-01	1,20E-01	-2,636	0,00861	**
Revenu	9,84E-06	7,07E-06	1,392	0,16451	

¹Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.2 on 594 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.517, Adjusted R-squared: 0.509

F-statistic: 57.9 on 11 and 594 DF, p-value: <2e-16

Fait intéressant : la variable caractérisant la densité du réseau routier hors autoroute dispose d'un coefficient négatif. Cela signifie que, par rapport à notre référence, si le réseau est plus dense, les VKT par personne des résidents diminuent. Une explication possible est que comme les secteurs de référence sont des secteurs centraux, un secteur disposant d'un réseau routier encore plus dense

signifierait rla une plus grande densité de destinations à proximité des résidents, qui pourrait se traduire par des déplacements plus courts. Cela pourrait indiquer un réseau routier possiblement quadrillé qui facilite les déplacements actifs et l'efficacité du TC, entraînant un transfert modal de l'automobile (autoconducteur) vers ces modes de déplacements.

Il s'agit d'une hypothèse qui pourrait être vérifiée en cherchant à valider le nombre de déplacements par motif effectué, en analysant les parts modales et les flux de déplacements des résidents. Ce volet ne sera pas abordé dans ce projet de recherche vu que notre objectif, tel que mentionné précédemment, est d'analyser les interactions entre l'évolution de l'étalement urbain, de l'offre en transport et de la demande en transport.

L'atteinte de cet objectif nécessite une analyse croisée des évolutions et des constats précédents, et c'est là tout l'objet de la section qui suit.

4.4 Analyse croisée

La dernière étape de l'analyse du projet en cours est l'analyse croisée. L'objectif est de pouvoir mettre en perspectives les différents constats tirés des analyses précédentes.

La première section dresse un constat en croisant les résultats obtenus des calculs précédents.

La deuxième section propose des calculs d'élasticité ayant pour objectif d'expliquer l'impact combiné de l'augmentation de l'offre et de l'étalement urbain sur la demande en transport.

La dernière section analyse quelques indicateurs de mobilité et leur variation par rapport à la typologie d'étalement urbain.

4.4.1 Constats

Lors des analyses précédentes, une comparaison entre l'évolution de la capacité offerte, les VKT consommés et l'évolution de la population a été réalisée pour chaque secteur.

Sachant que chaque secteur a reçu une affectation de la typologie d'étalement urbain, il a été possible de dresser un constat de l'évolution croisé par secteur. En nous intéressant dans un premier temps à l'impact de l'appartenance à un type de la typologie d'étalement urbain sur l'évolution croisée de l'offre et de la demande, on peut dresser un constat sur le comportement des secteurs pour chaque typologie.

Là encore, pour éviter l'effet engendré par la sensibilité des résultats en regard de la dispersion géographique de l'échantillon de répondants, l'analyse se fera parallèlement à un niveau plus agrégé en secteurs municipaux. Le type hérité par le secteur municipal correspond à celui du SR ayant le plus important chevauchement géographique.

Pour justifier ce choix, il suffit de comparer l'évolution croisée de l'offre et de la demande pour les SM en Figure 4.31 à la même évolution, mais pour un découpage plus fin en SR, illustré par la Figure 4.32 : On remarque que l'analyse en secteurs de recensement fait ressortir d'importants pourcentages d'évolution en comparaison à l'agrégation en secteurs municipaux, mais elle ne permet pas de clairement séparer les secteurs selon leur type. Grâce aux secteurs municipaux, on constate plus aisément que certains secteurs concentrés ont des augmentations de capacité routière même si la consommation de VKT a baissé. Le secteur municipal 521 repéré comme étant un secteur légèrement concentré et ayant évolué en secteur dispersé, est encadré à la figure 4.31 (Carignan, Chambly). Il se caractérise par une évolution marquée de l'offre, alors que la consommation des VKT y a connu une baisse.

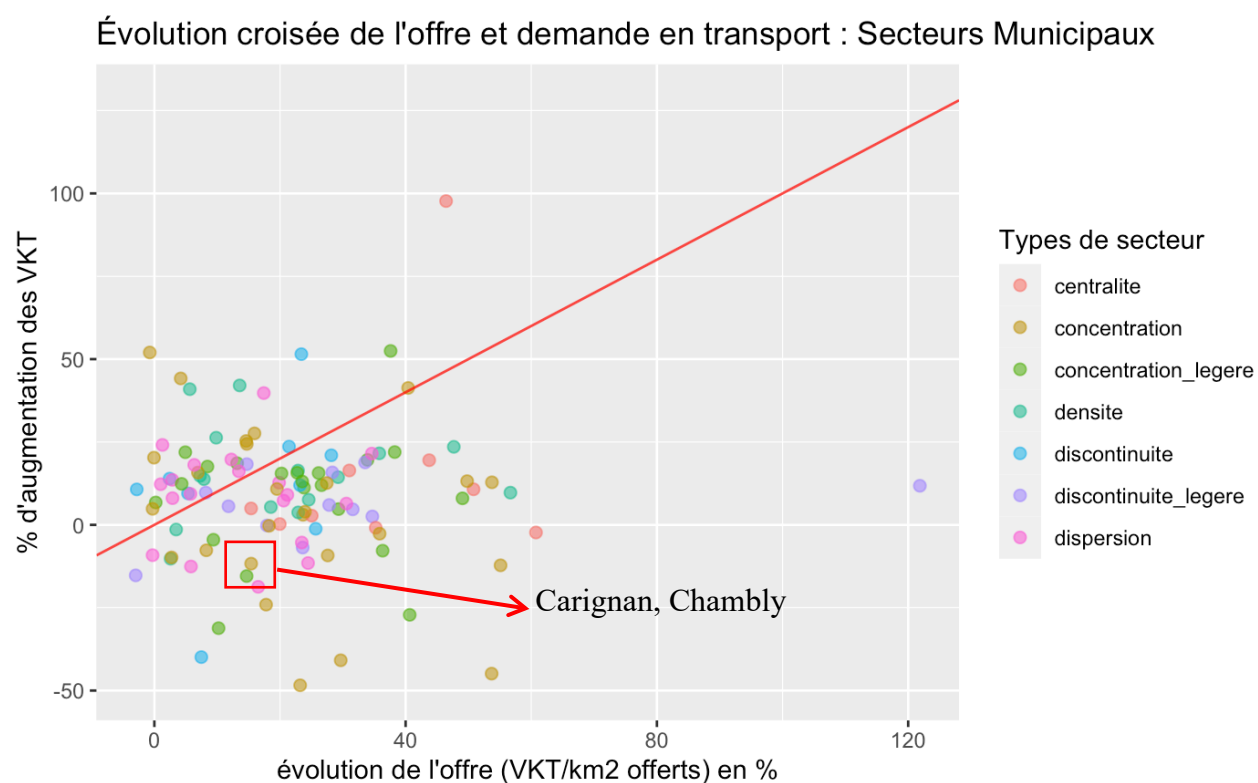


Figure 4.32 Évolution croisée de l'offre et de la demande en transport - SM

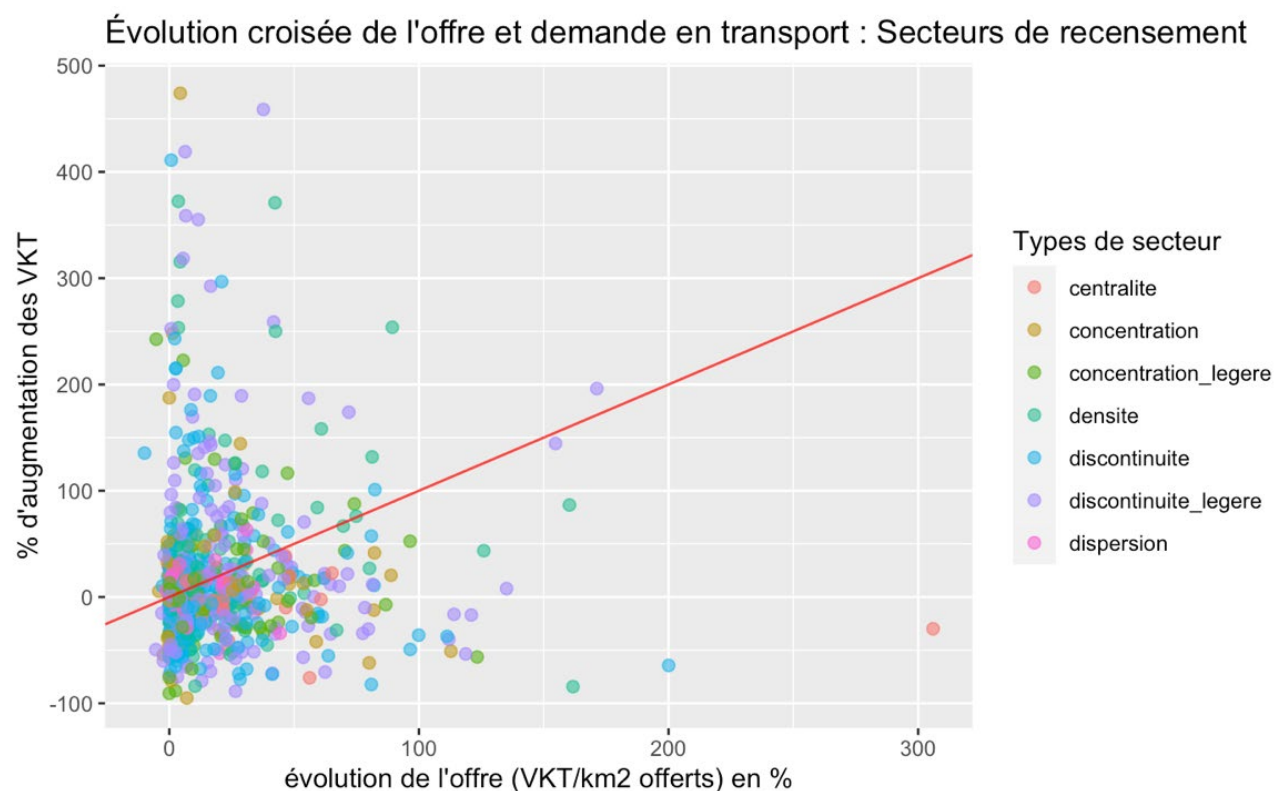


Figure 4.33 Évolution croisée de l'offre et demande en transport - SR

Pour déceler plus clairement l'impact de l'appartenance à un type d'étalement urbain on sépare les graphiques par type, la Figure 4.33 illustre l'évolution de la demande par rapport par SR éclatée par type. On observe clairement une réponse différente en fonction des types. Pour les secteurs centraux, la demande ne réagit pas fortement à l'augmentation de l'offre en transport. Les secteurs discontinus et légèrement discontinus par contre semblent subir une forte augmentation des VKT lorsque la capacité offerte augmente. Les secteurs dispersés semblent avoir une réponse assez mitigée et équilibrée quand l'offre augmente : certains ont vu leur demande augmenter proportionnellement à l'offre alors que d'autres ont observé une baisse.

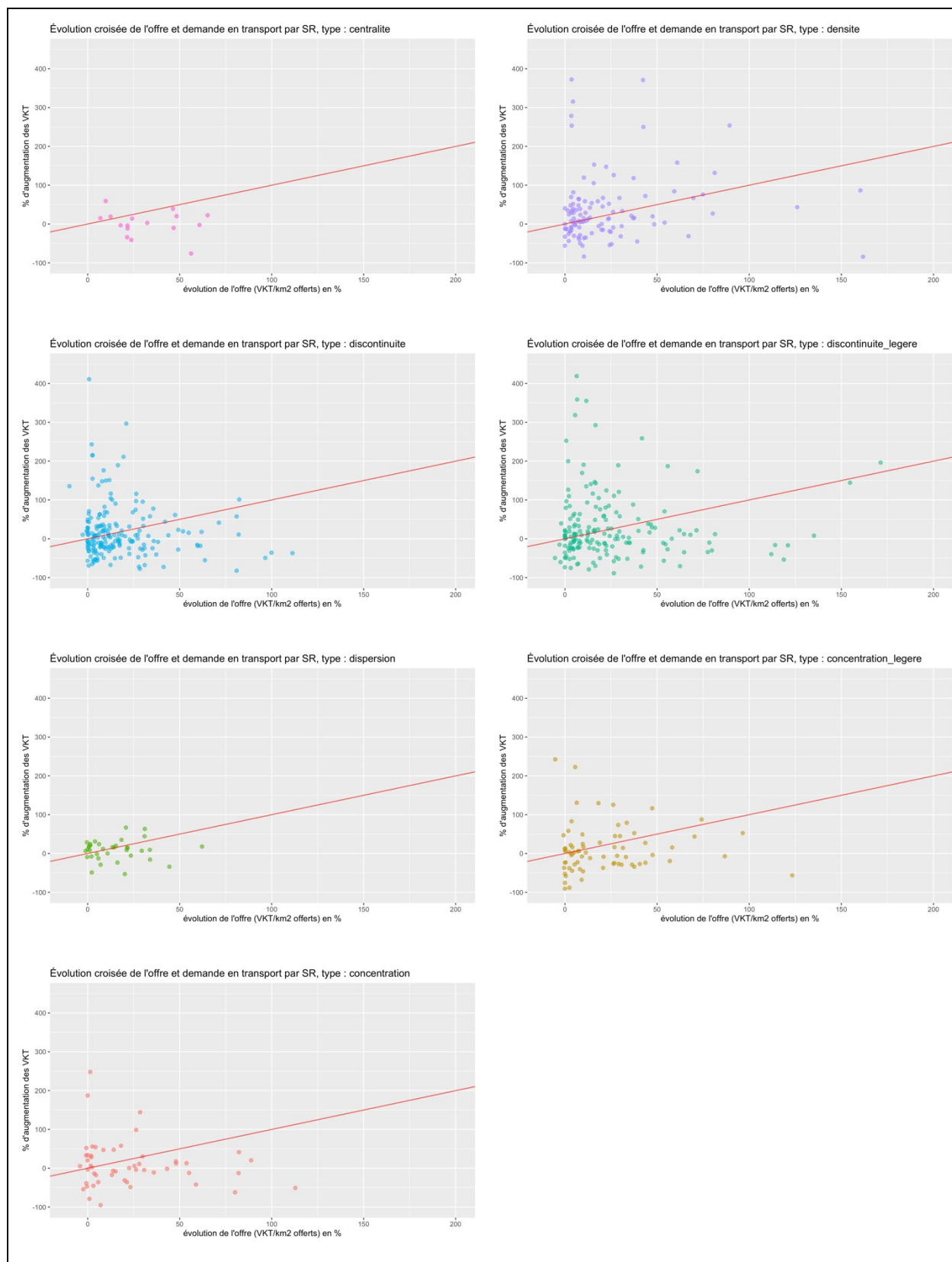


Figure 4.34 Évolutions croisées de l'offre et demande en transport par typologie - SR

Cela pourrait rejoindre le constat précédent concernant les secteurs de la Rive-Sud où c'est l'effet d'échelle, combiné à la hausse des parts des non-mobiles, qui engendre une baisse des VKT. La densification et la concentration de ces secteurs pourraient augmenter la disponibilité d'alternatives de transport en modes actifs ou en TC, cela se traduirait par une augmentation de leur part modale entraînant une diminution des kilomètres parcourus en autoconducteur. L'analyse en secteurs municipaux (voir Figure 4.34) pourrait ramener un éclairage complémentaire quant à l'effet d'échelle.

Le constat concernant les secteurs centraux et dispersés confirme l'effet d'échelle soupçonné précédemment : à l'échelle municipale, on observe peu de baisses significatives des VKT consommés. La réponse des secteurs dispersés reste néanmoins conforme au constat précédent : on observe presque autant de secteurs ayant une augmentation de VKT supérieure à celle de l'offre que l'inverse.

Ces analyses démontrent clairement que l'étalement urbain a un impact sur l'évolution croisée de l'offre et de la demande en transport. L'appartenance à un secteur modifie sa réponse (VKT) face à l'évolution de l'offre observée d'une part, et modifie également le % d'augmentation de la capacité offerte.

Le nuage de points pour les secteurs considérés comme étalés a généralement une forme aplatie suggérant une augmentation de capacité plus rapide que sa consommation.

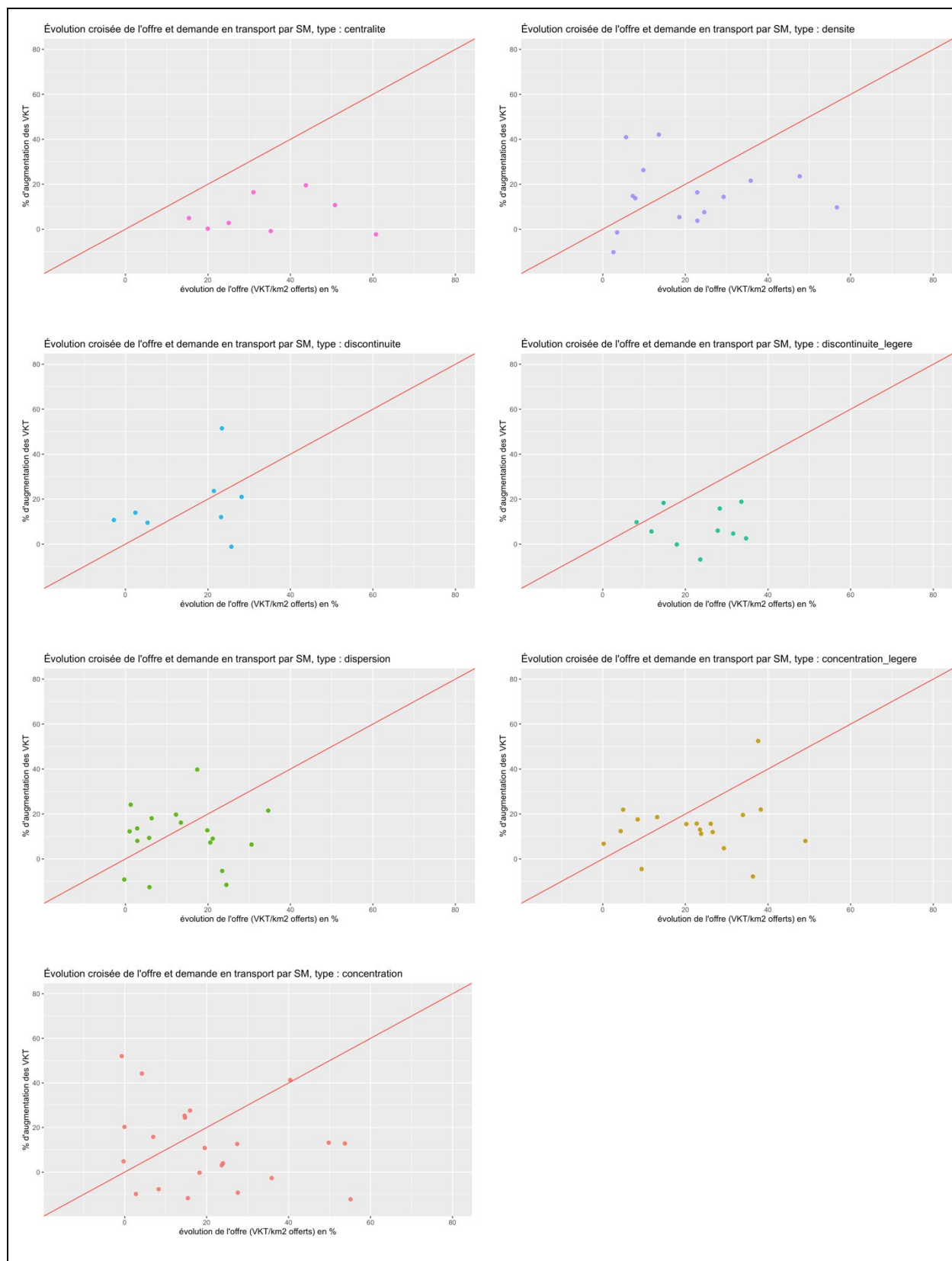


Figure 4.35 Évolutions croisées de l'offre et demande en transport par typologie - SM

Un concept intéressant à explorer pour statuer encore plus clairement sur les relations entre les trois sphères à l'étude est le concept d'élasticité.

4.4.2 Élasticités

Pour nous permettre de mieux évaluer l'impact de l'augmentation de l'offre routière et de l'étalement urbain sur la consommation de VKT, un calcul d'élasticité est mené pour le territoire étudié. La variable a pour forme :

$$\text{élasticité}_{\text{secteur}} = \frac{\% \text{ d'évolution des vkt consommés}}{\% \text{ d'évolution de la capacité offerte}}$$

Avec pour chaque secteur :

$$\% \text{ d'évolution de la capacité offerte} = \left(\frac{\text{VKT par km}^2 \text{ offerts en 2015}}{\text{VKT par km}^2 \text{ offerts en 2009}} - 1 \right) \times 100$$

$$\% \text{ d'évolution des vkt consommés} = \left(\frac{\text{VKT consommés par les résidents en 2016}}{\text{VKT consommés par les résidents en 2011}} - 1 \right) \times 100$$

Ce calcul sera mené à la fois au niveau des secteurs du découpage initial et au niveau des secteurs municipaux afin d'éviter une interprétation biaisée par l'effet de frontière des SR.

Les secteurs ayant observé une très légère baisse de l'offre (moins de 6%) ont été exclus du calcul, car on suppose ici qu'une telle baisse serait plutôt liée à la modification de codification et à l'erreur résiduelle de l'algorithme de jointure appliqué au réseau routier. Pour rappel, l'algorithme de jointure a permis de joindre près de 83% du réseau et non 100%.

Ces hypothèses permettent de recentrer les élasticités sur des valeurs plus plausibles et comparables entre territoires. Une valeur d'élasticité "x" positive signifierait que les VKT consommés ont augmenté de "x%" lorsque l'offre a augmenté de 1%. Une élasticité négative "y" signifierait au contraire que la consommation de VKT a diminué de "y%" lorsque l'offre a augmenté de 1%.

La carte (Figure 4.35) représente les valeurs obtenues pour un découpage en SR et la Figure 4.36 illustre les valeurs obtenues pour un découpage en SM. L'objectif est de pouvoir établir un constat visuel de la répartition des valeurs d'élasticité calculées.

Le découpage plus fin en SR semble avoir un impact sur les variables obtenues. Les élasticités semblent bien plus élevées que lorsqu'on les compare aux valeurs obtenues pour un découpage en SM, cela se confirme lorsque l'on s'intéresse à leur distribution (voir Figure 4.37). On peut remarquer que plus de 20% des élasticités SR sont supérieures à 5 et près de 13% des élasticités des SR sont inférieures à -5. Les valeurs d'élasticités des SM sont par contre plus concentrées dans l'intervalle $[-5,5]$ avec un pic atteint entre 0 et 1.

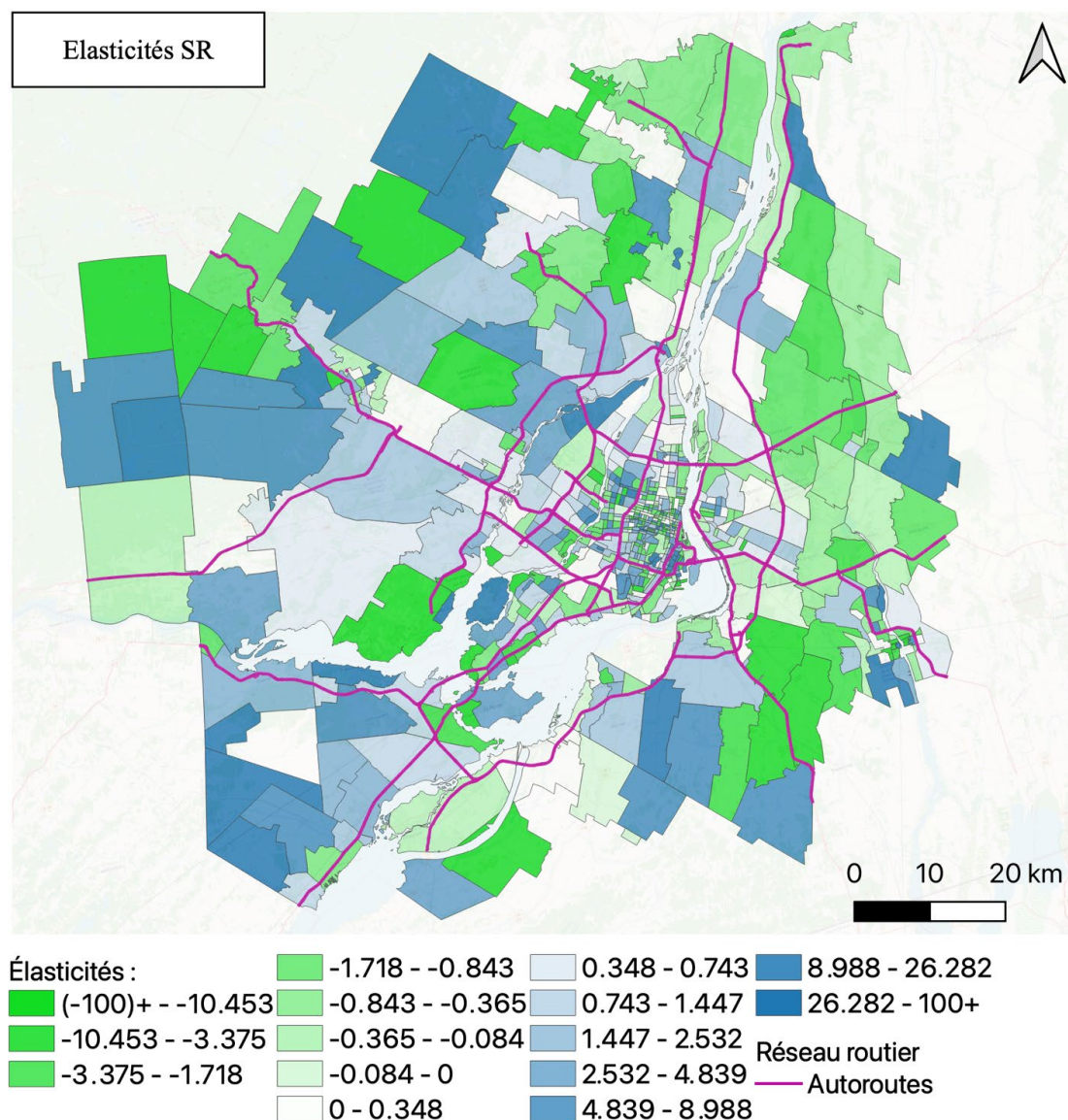


Figure 4.36 Élasticités entre l'augmentation de la demande de transport et de l'offre routière - découpage SR

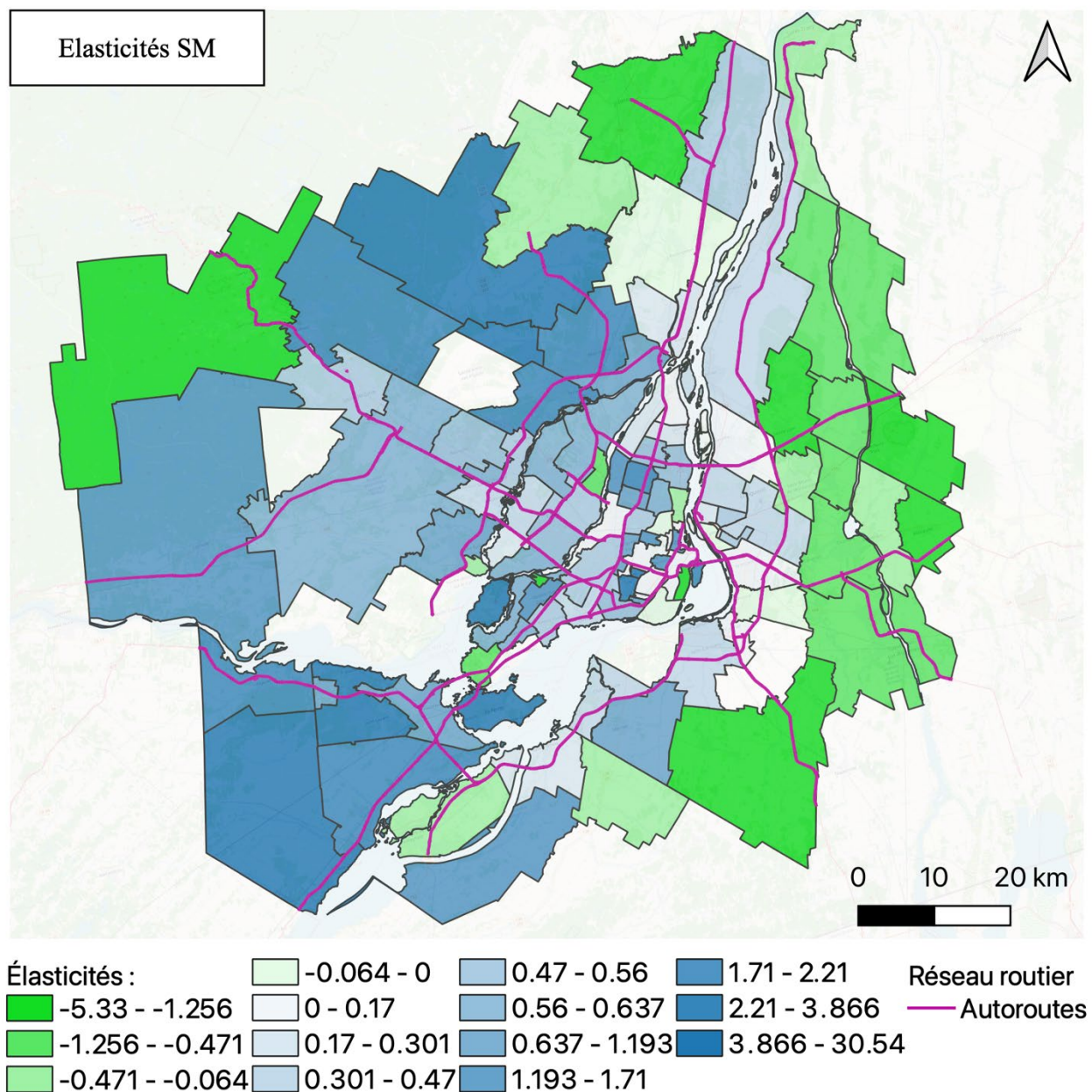


Figure 4.37 Élasticités entre l'augmentation de la demande de transport et de l'offre routière pour un découpage en SM.

La distribution des valeurs d'élasticités (voir Figure 4.35Figure 4.37) pour les SM permet donc de mieux apprécier les différences entre secteurs. Le constat général que l'on peut en tirer de la répartition spatiale des valeurs d'élasticités est que la Couronne Sud, en raison de la baisse des VKT consommés observés précédemment, présente des élasticités négatives sur une partie de la surface

couverte alors que pour la Couronne Nord, plusieurs secteurs observent des valeurs d'élasticités élevées.

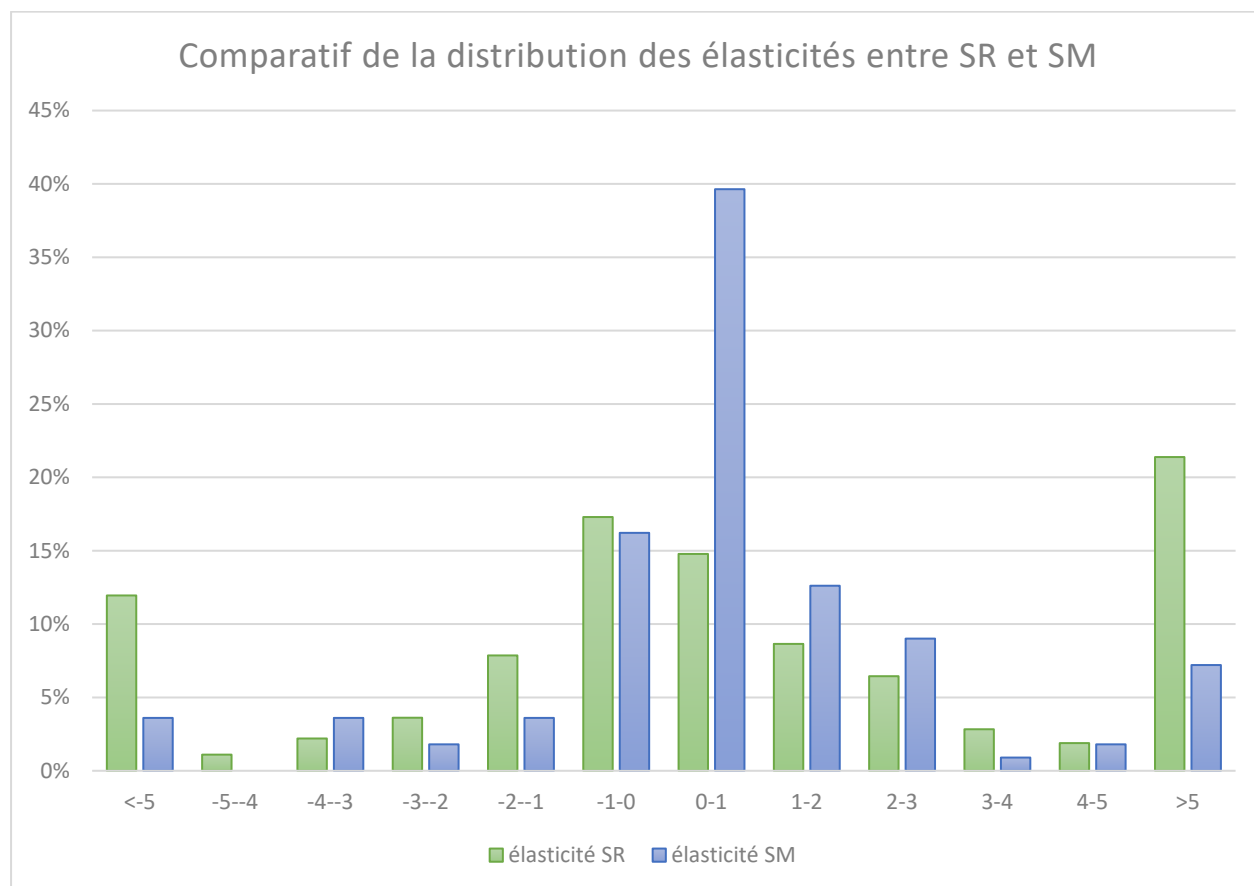


Figure 4.38 Comparatif de la distribution des élasticités entre SR et SM

Pour analyser plus en détail l'impact de l'étalement urbain sur ces élasticités, on analysera de plus près l'impact de l'appartenance à un type donné. La Figure 4.38 représente un comparatif des distributions des valeurs d'élasticités observées. Le choix des SM s'impose pour cette analyse vu la différence de valeurs obtenues avec les SR. La répartition et les valeurs des élasticités des secteurs municipaux observés permettent de tirer un constat plus intuitif en éliminant l'effet lié à la finesse du découpage.

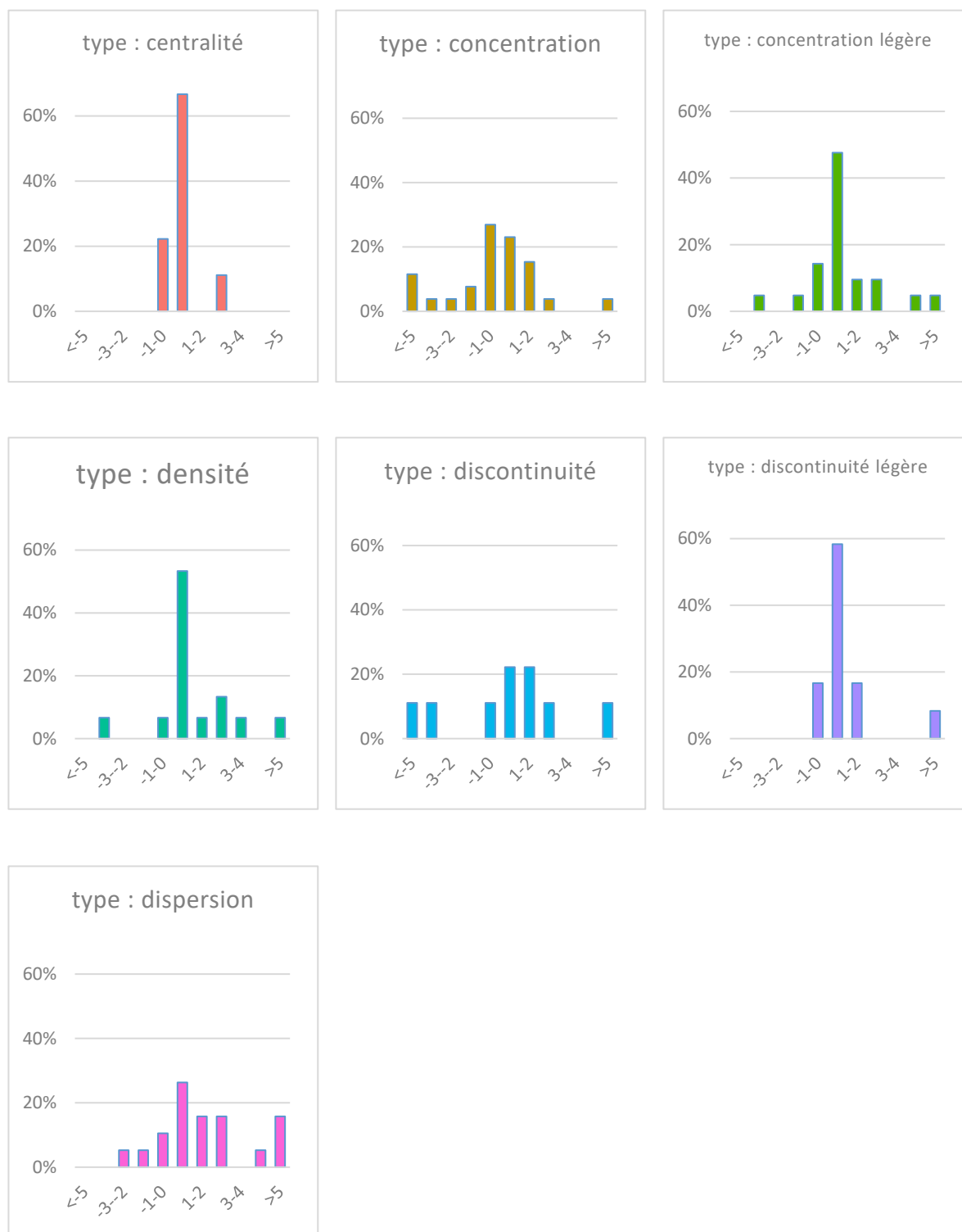


Figure 4.39 distributions des élasticités par typologie - SM

On remarque clairement que les distributions varient en fonction de l'appartenance d'un secteur à un certain type. Pour les secteurs centraux, les valeurs d'élasticités sont assez faibles et principalement centrées autour de 0. À l'opposée, la distribution aplatie des secteurs dispersés suggère qu'un spectre plus large et doté de valeurs plus élevées d'élasticités caractérise ce type de secteur.

L'appartenance aux secteurs concentrés et discontinus semble entraîner une distribution similaire des élasticités. Il est cependant étonnant de constater que la forme de la distribution des élasticités des secteurs légèrement discontinus se rapproche de la réponse des secteurs centraux. Cela ne signifie pas nécessairement que ces secteurs sont similaires, même si leurs élasticités sont comparables, les volumes traités (évolution des VKT consommés et de l'offre) peuvent être significativement différents.

Pour appuyer ce constat, un diagramme en boîte est présenté pour mieux visualiser les différences d'élasticités des SM et SR. La Figure 4.39 illustre le résultat pour les SR et la Figure 4.40 représente le résultat par SM. L'impact de l'étalement urbain se confirme en observant ces figures : des secteurs municipaux se démarquent particulièrement du reste, notamment les secteurs concentrés qui observent des élasticités négatives et une moyenne plus basse que le reste des secteurs.

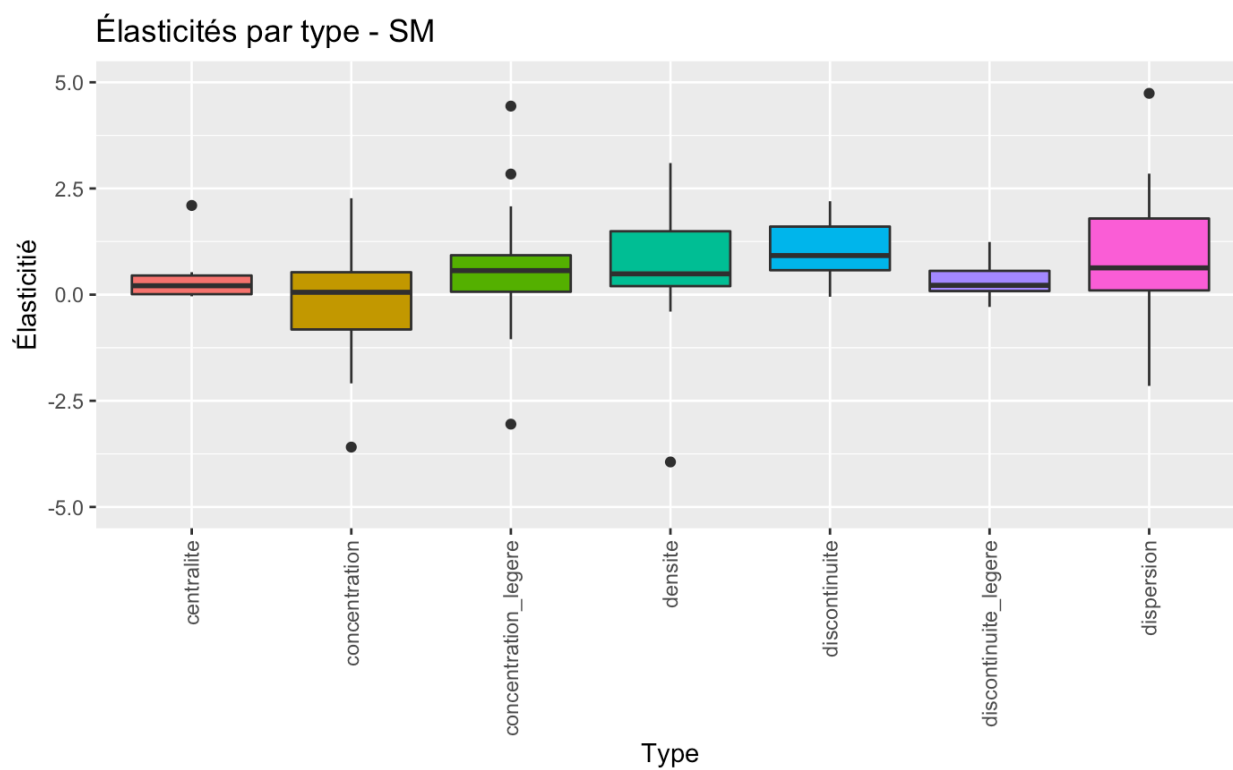


Figure 4.40 Diagrammes en boîte - élasticité par type de secteur - SR

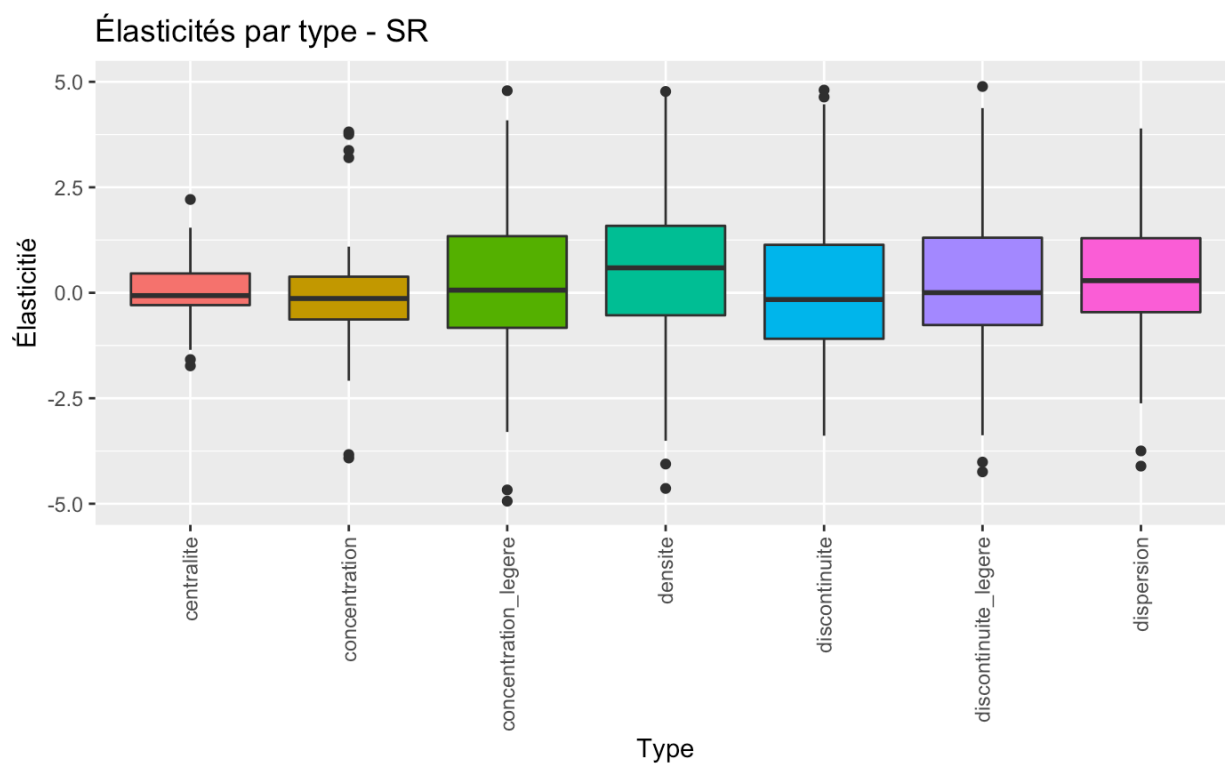


Figure 4.41 Diagrammes en boîte - élasticité par typologie - SM

Avant de nous intéresser plus en détail à ce type, il serait utile de noter également l'impact de la granularité supérieure du découpage en SR : plusieurs élasticités sont négatives avec des moyennes très rapprochées. Là encore, l'effet de la dispersion spatiale des répondants et l'affectation de capacité routière à des secteurs "fin" serait certainement en cause et pourrait entraîner un biais d'interprétation quant aux élasticités qui en découlent.

4.4.3 Indicateurs de mobilité

Le dernier éclairage à amener sur cette analyse consiste en la création d'un tableau récapitulant l'impact de l'appartenance à un type sur des variables décrivant la mobilité et la démographie des résidents. Cela permettra également d'analyser plus en détail le comportement des secteurs concentrés.

L'objectif est de déceler des effets combinés de variables pouvant expliquer certains constats et interrogations (élasticités négatives pour certains secteurs concentrés par exemple). Les calculs se sont faits à l'échelle municipale.

Les valeurs représentées dans cette section sont les moyennes des valeurs pour les secteurs appartenant au même type et non une moyenne des moyennes par secteur. À titre d'exemple, le calcul pour les distances moyennes de déplacement pour un type se fait grâce à l'équation :

$$Distance\ moyenne\ déplacement_{typologie} = \frac{\sum_{(secteurs) \in typologie} (distances\ de\ déplacement \times facteur\ de\ pondération)}{\sum_{(secteurs) \in typologie} facteur\ de\ pondération}$$

Le même principe de calcul est appliqué à l'ensemble des variables listées.

On liste ci-dessous une partie des résultats en mettant l'accent sur les pourcentages d'évolution qu'il semble intéressant d'explorer. La liste complète des valeurs et résultats obtenus est reprise en annexe afin de ne pas alourdir cette section.

Une analyse approfondie des résultats permettra d'ouvrir davantage de perspectives et d'opportunités d'analyse de l'impact de l'étalement urbain pour de futures recherches.

4.4.3.1 Statistiques

Au niveau des statistiques propres à la typologie des secteurs, on observe au niveau des superficies couvertes du territoire (Figure 4.41) que les secteurs concentrés occupent une grande partie du territoire suivis par les secteurs dispersés. Il est intéressant de noter que la part occupée par ces

types augmente entre 2013 et 2018, tandis que la baisse la plus marquée concerne les secteurs légèrement concentrés.

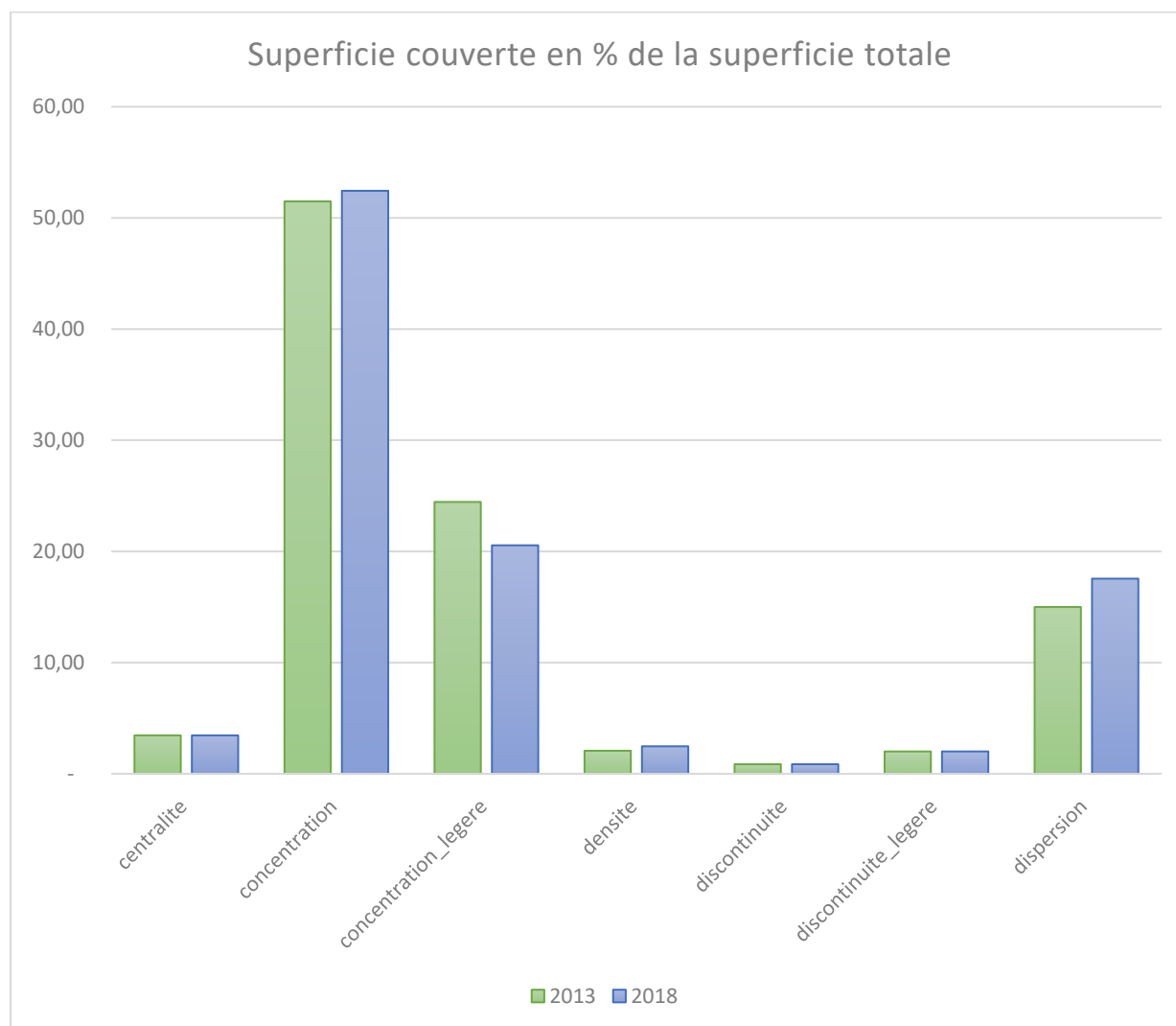


Figure 4.42 Part de la superficie couverte par type de secteur

En nous intéressant maintenant à la répartition de la capacité offerte et son évolution : on remarque grâce à la Figure 4.42 que c'est pour les secteurs concentrés et denses que la capacité offerte a connu la plus forte hausse. Vu la part de la surface couverte par les secteurs concentrés, cette hausse aurait une amplitude assez importante sur l'ensemble du territoire.

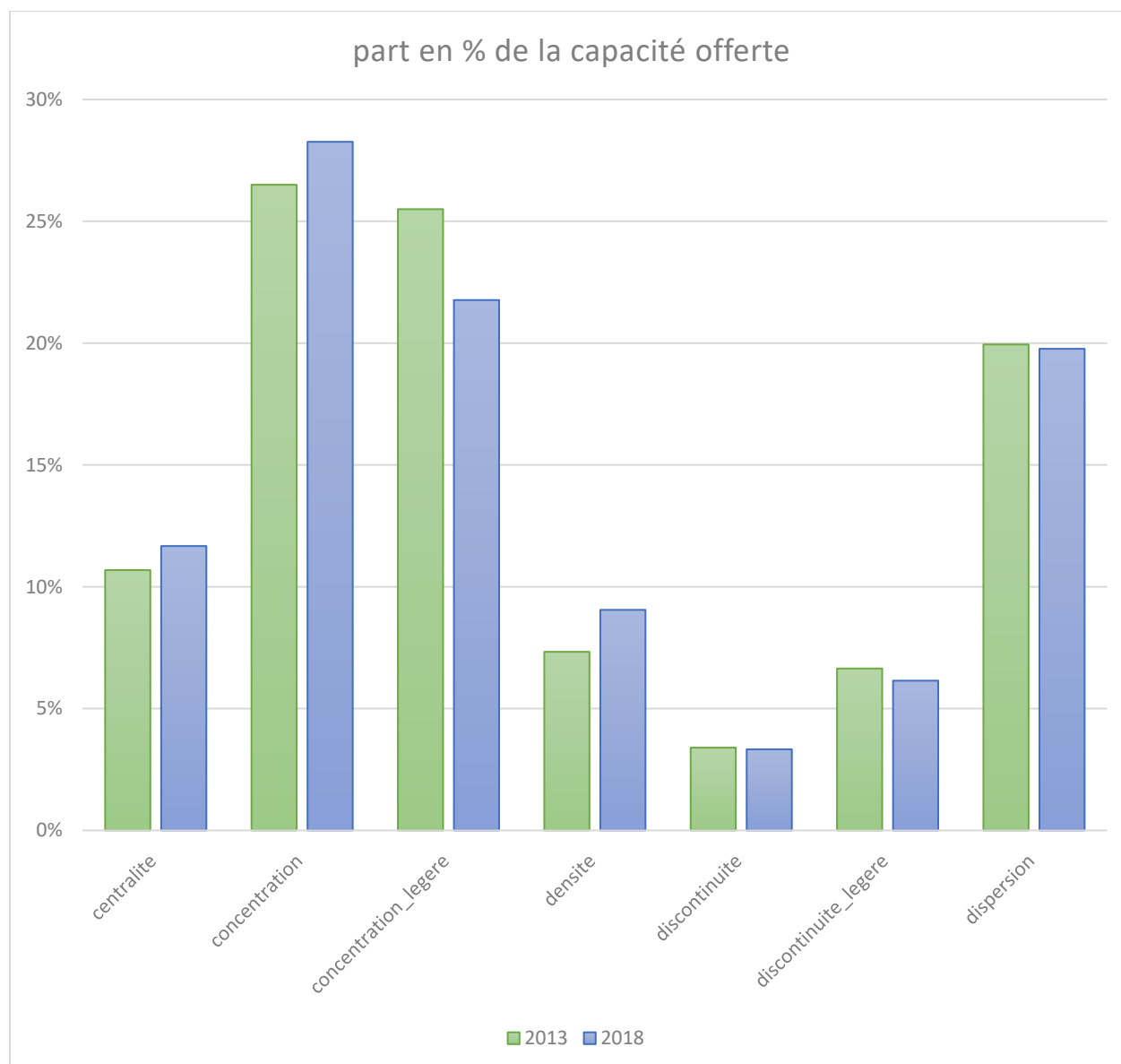


Figure 4.43 Part de la capacité offerte par type de secteur

La part des secteurs légèrement concentrés a subi une baisse. En nous intéressant à l'évolution du nombre de secteurs légèrement concentrés (annexes T et U), on pourrait l'expliquer par la diminution des secteurs appartenant à ce type.

4.4.3.2 Démographie

Au niveau de la démographie, on s'intéresse à la répartition de la population, aux travailleurs à temps plein et aux non-mobiles.

La Figure 4.43 illustre la répartition de la population par type de secteur. On n'y remarque quasiment pas d'évolution, la population ne change pas de répartition entre 2013 et 2018. Pour les deux années, environ 14% de la population occupe des secteurs concentrés, alors que les analyses précédentes démontrent que ces secteurs occupent une grande part du territoire et ont observé une augmentation de capacité routière assez importante

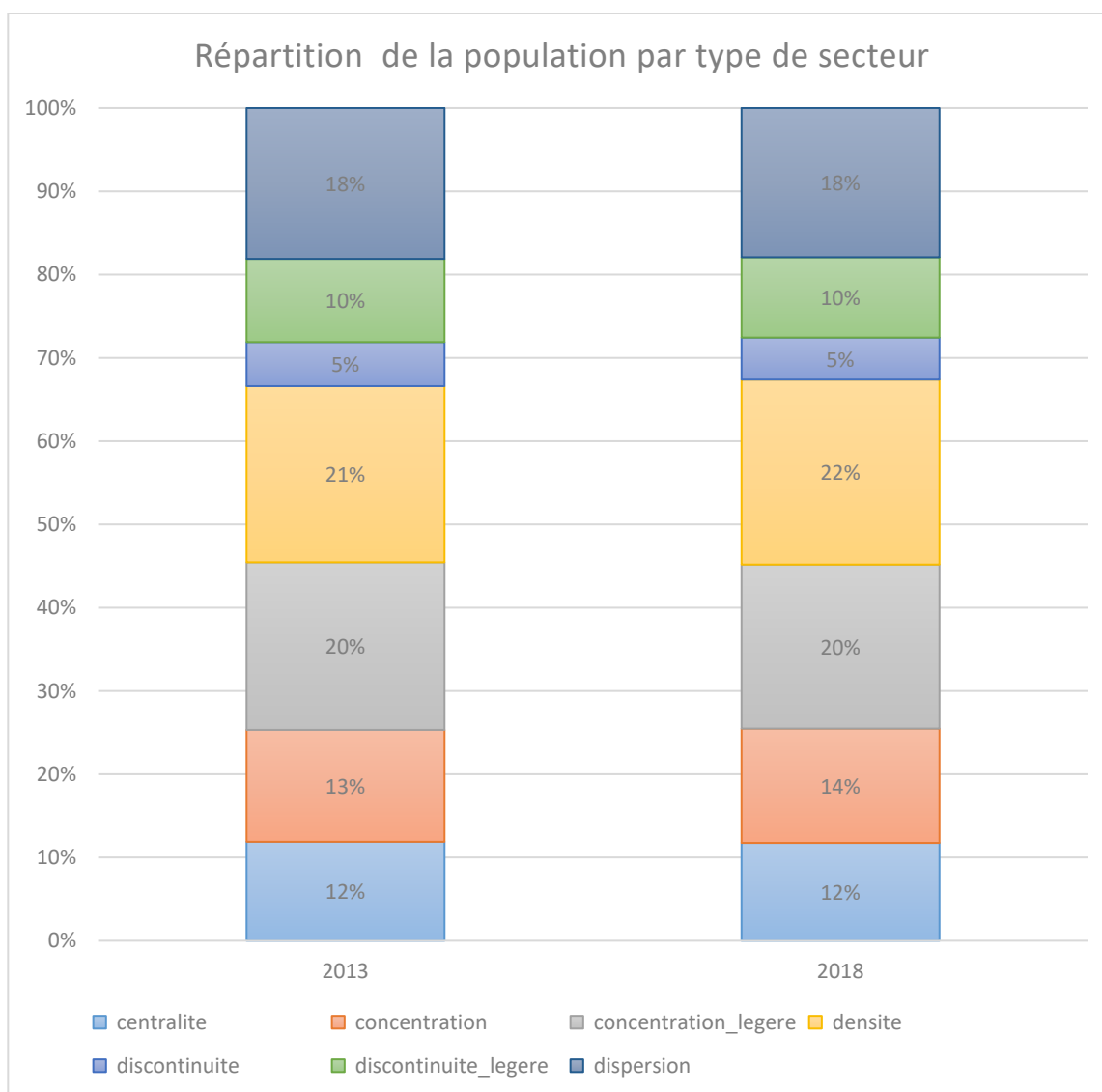


Figure 4.44 Répartitions de la population par type de secteur

Pour la part des travailleurs à temps plein, la Figure 4.44 suggère une part légèrement plus importante pour les secteurs concentrés avec une légère baisse observée en 2018

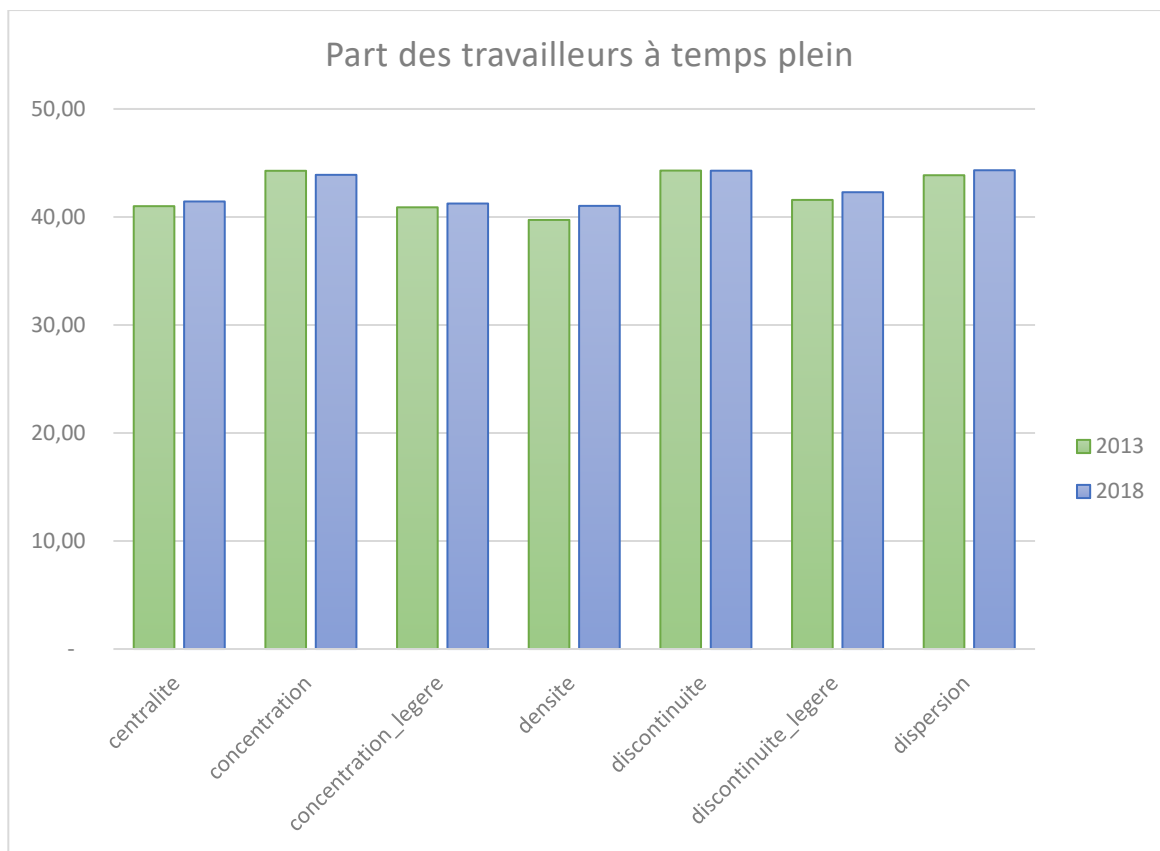


Figure 4.45 Part des travailleurs à temps plein par type de secteur

la part de population non-mobile a été explorée, le calcul de cette variable s'est effectué en considérant la part de l'ensemble des non-mobiles résidants dans des secteurs appartenant à un type :

$$Part\ non\ mobiles_{type} = \frac{\sum_{résident \in (type)} I_{Non-mobile} \times facper}{\sum_{résident \in (type)} facper}$$

Avec

$I_{Non-mobile} = 1$ si la personne est non mobile et 0 sinon.

$facper$ est le facteur de pondération du résident d'un secteur appartenant au type analysé

On observe peu de variations au niveau de la répartition des parts des non-mobiles entre secteurs (Figure 4.45) mais ces variations peuvent tout de même impacter la demande. Il est possible

d'approfondir cette réflexion en validant les types de secteurs ayant observé les valeurs minimales, maximales et médianes de la population non mobile.

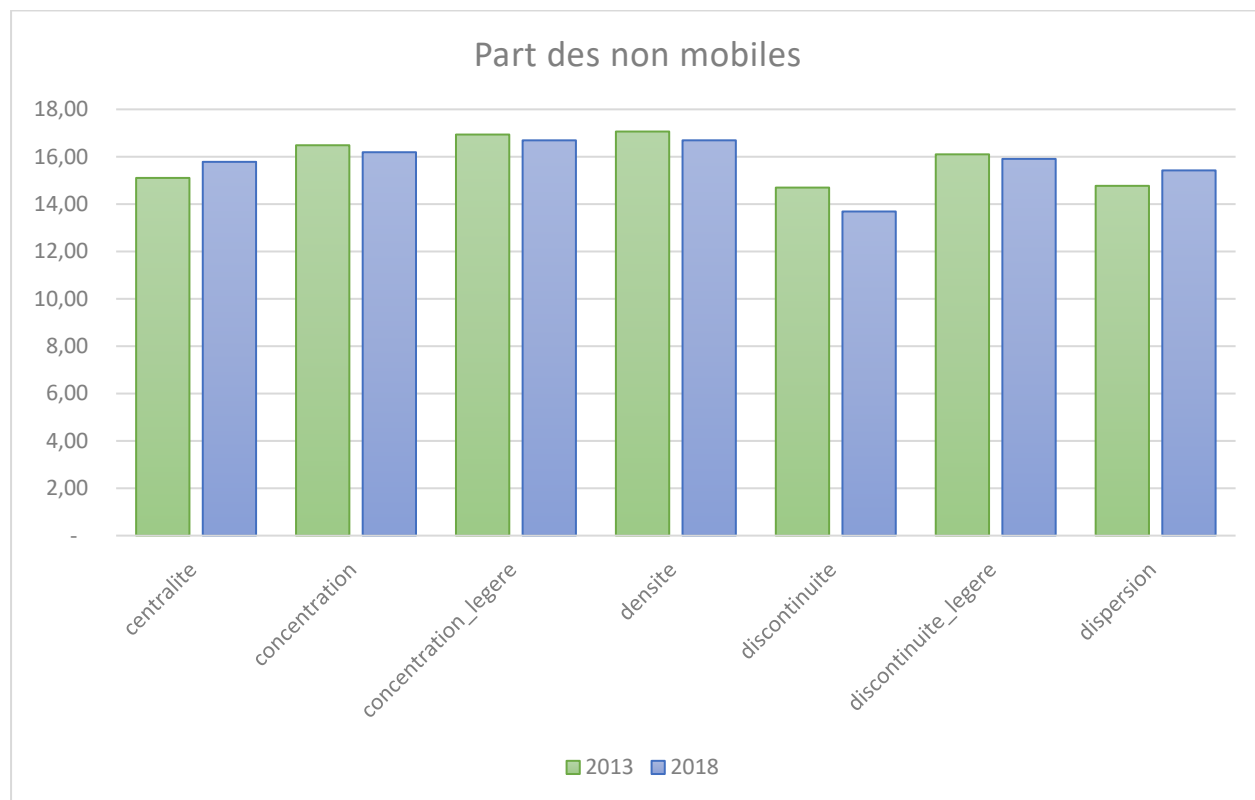


Figure 4.46 Part des non-mobiles

Le Tableau 4.4 reprend les secteurs ayant respectivement les valeurs min, max et médianes de la population non mobile. On n'y observe pas de différence entre les deux années étudiées, mais à l'échelle d'une année, les secteurs concentrés abritent une valeur médiane de la population non mobile, alors que les secteurs discontinus et denses ferment respectivement l'intervalle [min, max] de cette variable. Le résultat n'est pas étonnant pour les secteurs denses vu qu'ils abritent une forte population, le fait que les non mobiles des secteurs concentrés représentent la médiane des valeurs pourrait par contre appuyer l'hypothèse que l'augmentation même légère de la part des non-mobiles impact les déplacements AC à la baisse.

Tableau 4.6 Statistiques d'appartenance par type de la population non mobile

année	type ayant la valeur min de non mobiles	type ayant la valeur max de non mobiles	type ayant la valeur médiane de non mobiles
2018	discontinuité	densité	concentration
2013	discontinuité	densité	concentration

Il est pertinent de noter que la Figure 4.45 représente la part des non-mobiles pour l'ensemble des secteurs appartenant à un même type. Certains ont subi une baisse alors que d'autres ont connu une hausse pour une même classification. L'analyse de cette variable par secteur permet de déceler davantage de fluctuations, comme celles relevées au niveau des secteurs de la couronne sud.

Le constat que l'on peut tirer est que les secteurs discontinus connaissent la part la moins importante de non-mobiles et que les secteurs denses et centraux observent une très légère hausse en 5 ans de la part de la population non-mobiles. Il serait possible de développer encore plus cette analyse si nécessaire en analysant par la suite l'âge de la population et notamment le % des 65ans et plus par exemple.

4.4.3.3 Mobilité

Pour analyser à présent quelques variables de mobilité associées à la typologie de secteurs, la section qui suit met en évidence les parts modales, les distances moyennes de déplacement et les nombres de déplacements par motif observés en fonction du type de secteurs.

Le tableau des résultats en (annexes T et U) liste une série de variables qui ne seront pas analysées en détail ici, mais qui pourraient contribuer à une étude future des impacts de l'étalement urbain sur la mobilité. On peut notamment citer les distances moyennes de déplacement par mode pour chaque type, les distances moyennes par motif et par type ou encore les parts des déplacements effectués par motif.

Pour assurer une meilleure lisibilité, les résultats sont présentés en deux graphiques distincts: parts modales pour 2018 par type puis graphiques d'évolution des parts modales. Le graphique comparatif des parts modales pour l'ensemble des secteurs est en Annexe X.

L'équation suivante est un exemple utilisé pour calculer la part modale des déplacements AC :

$$Part_{modale}(AC) = \frac{\sum I_{ac} \times facper}{\sum I_{SD} \times facper}$$

Avec

$I_{ac}=1$ si le déplacement est effectué en AC, 0 sinon.

$I_{SD} = 0$ si le mode déclaré est "sans déplacement", 1 sinon.

$facper$ est le facteur de pondération

Les parts modales en 2018 se présentent à travers la Figure 4.46, le constat est clair : les résidents des secteurs concentrés et dispersés utilisent davantage leur auto pour se déplacer que les résidents du reste du territoire.

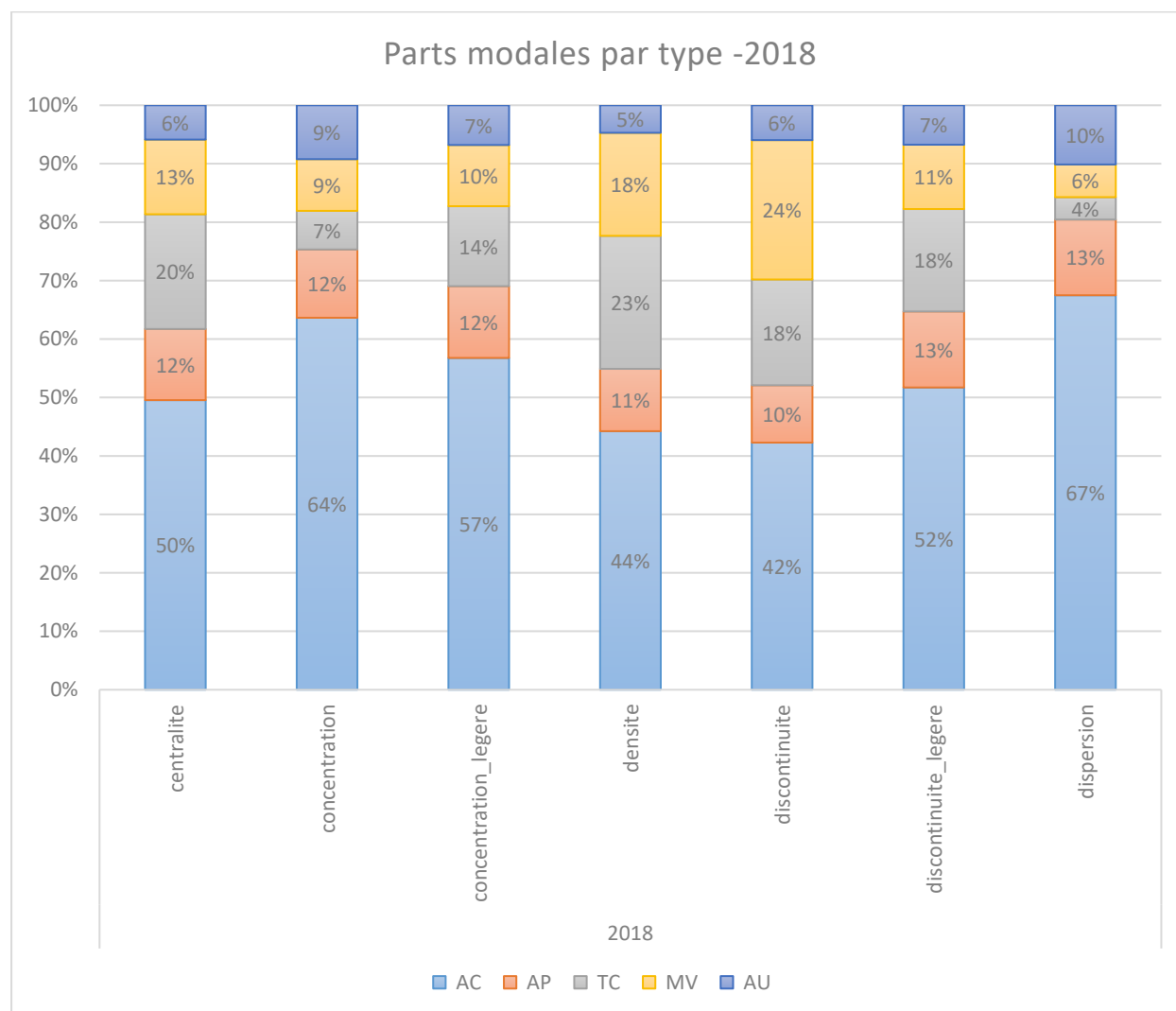


Figure 4.47 Parts modales par type de secteur

Il est également intéressant de noter que les secteurs discontinus sont ceux ayant la plus grande part de modes actifs alors qu'intuitivement, on s'attendrait à observer un tel résultat pour les secteurs denses. Ces derniers (secteurs denses) se démarquent plutôt par leur plus grande utilisation du TC, une piste à explorer serait l'impact qu'aurait la présence de lignes de métro à proximité des résidents, vu que les secteurs denses sont principalement situés à l'intérieur de l'Île de Montréal.

L'étape qui suit consiste à calculer l'évolution des parts modales grâce à l'équation :

$$\% \text{ d'évolution de la part modale} = 100 \times \left(\frac{Part_{modale}(2018)}{Part_{modale}(2013)} - 1 \right)$$

En regardant de plus près l'évolution des parts modales entre 2013 et 2018 (Figure 4.47), on remarque que l'utilisation du TC et des modes actifs pour les secteurs concentrés augmente de plus de 5% alors que l'utilisation de l'auto augmente à peine; l'utilisation de l'auto passager pour ces secteurs diminue en contrepartie.

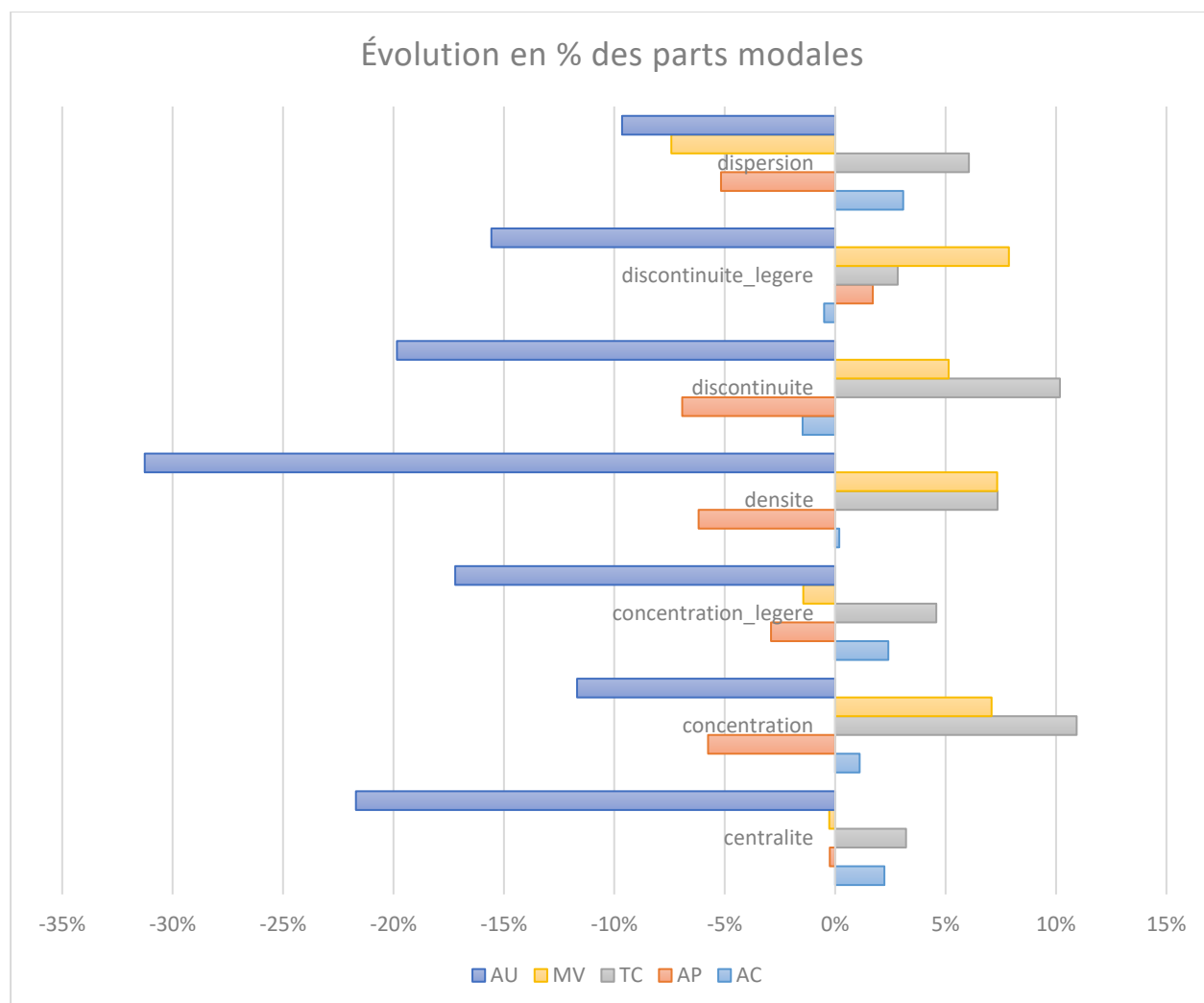


Figure 4.48 Évolutions des parts modales par typologie

Une hypothèse à vérifier est que, vu que ces secteurs se concentrent sur eux-mêmes, de nouvelles opportunités de déplacements plus courts s'offriraient aux résidents, et que ces déplacements ne nécessiteraient pas d'utiliser l'automobile.

Pour vérifier cette hypothèse, on s'intéresse désormais aux distances moyennes de déplacement AC ainsi qu'à leur évolution. La Figure 4.48 représente les distances moyennes de déplacement AC exprimées en km par type de secteur.

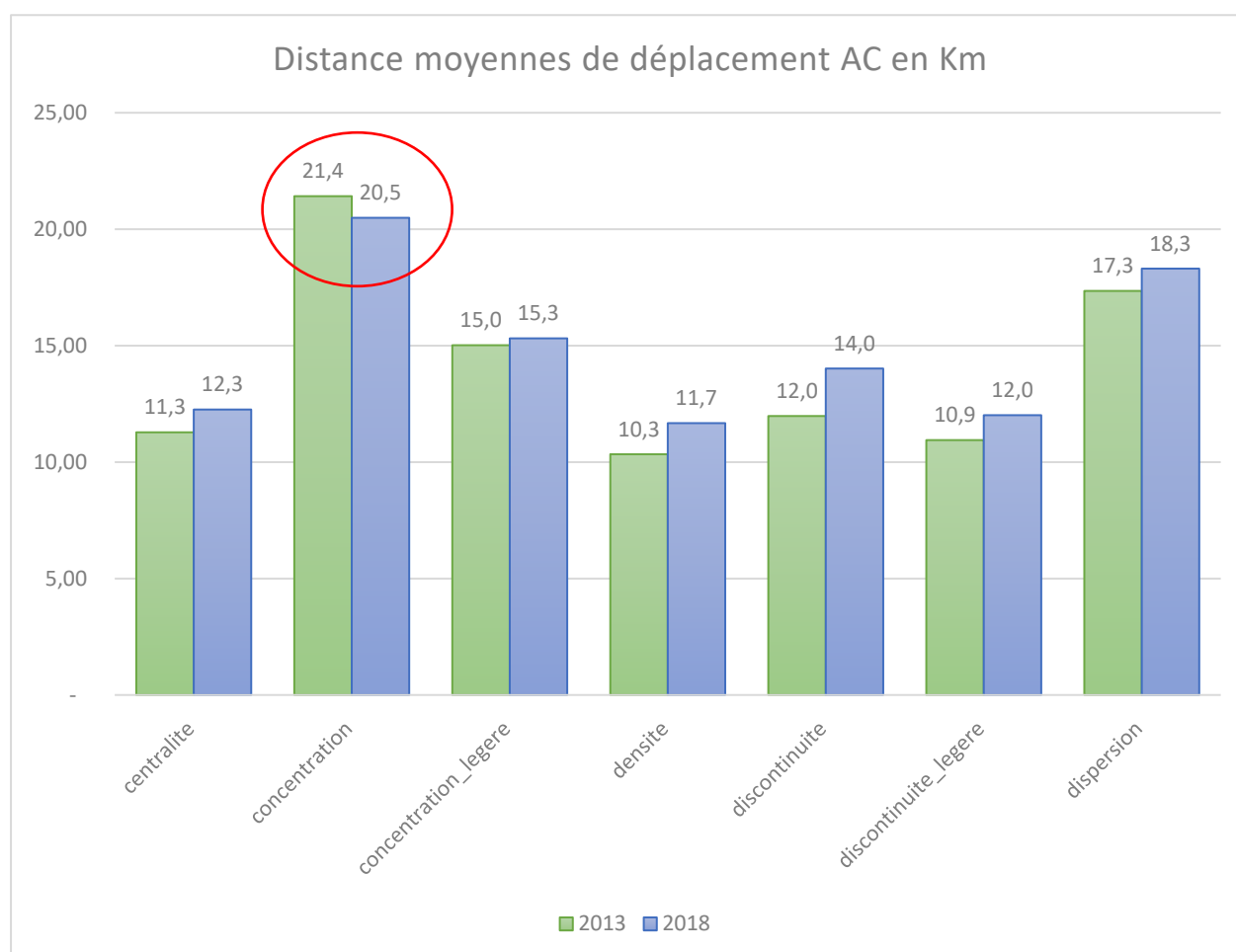


Figure 4.49 Distance moyenne de déplacement AC par type de secteur

L'hypothèse précédente semble se vérifier : seuls les secteurs concentrés ont constaté une baisse des distances moyennes de déplacement en automobile comme conducteur. Cette diminution peut sembler faible (5%), mais elle contribue à expliquer pourquoi ces secteurs ont des élasticités (demande/offre) négatives.

Les distances par motif sont disponibles en (annexes V et W). On s'intéressera, pour finaliser notre analyse, aux quantités de déplacements par motif.

La Figure 4.49 représente la moyenne pour les secteurs concentrés du nombre de déplacements par motif. Une légère baisse est généralement constatée pour l'ensemble des motifs de déplacement. Nous n'allons pas lister l'évolution pour l'ensemble des autres secteurs pour ne pas alourdir la section, mais un constat global est que le nombre de déplacements baisse très légèrement tous

motifs confondus (voir annexe V), de plus le nombre de déplacements est comparable entre secteurs et entre motifs. Il convient de mentionner que la population de ces secteurs a cru de 8% (détails en annexe S), la quantité de déplacements n'a donc pas baissé en raison d'une baisse de la population, mais il s'agit bien d'un changement de comportement qui est observé lorsque les secteurs se concentrent sur eux même.

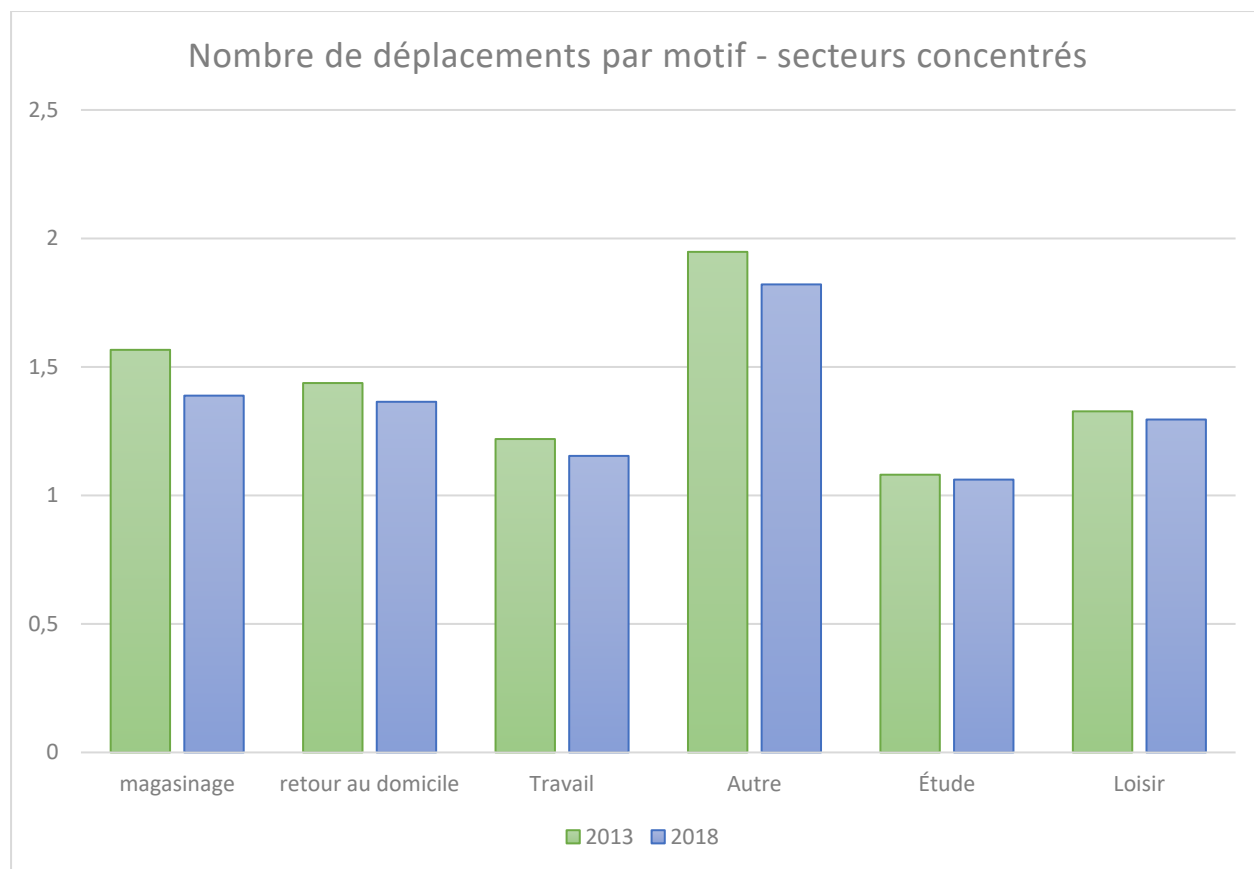


Figure 4.50 Nombre de déplacements par motif pour les secteurs concentrés

Cela vient mettre fin à notre analyse. Le fait remarquable est qu'il a été possible grâce à l'établissement d'une typologie d'étalement urbain de séparer des profils de croissance, tant au niveau de l'évolution de l'offre routière que de la consommation des VKT.

Cette dernière section démontre le potentiel des analyses complémentaires pouvant être tirées des résultats calculés. L'important est de tout de même considérer les limitations lors de l'interprétation des résultats.

Le chapitre qui suit clôt cette recherche en rappelant les contributions apportées, les limitations, ainsi que les perspectives de recherche.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Ce dernier chapitre composé, de trois sections distinctes, présente une synthèse des constats et des résultats obtenus, avant de dresser un état des contributions, pour s'achever par un énoncé des limitations rencontrées et perspectives de recherche.

5.1 Synthèse des travaux

La vision générale des interactions entre étalement urbain, offre et demande en transport s'éclaircit grâce aux résultats obtenus. Il a été démontré que le territoire du grand Montréal souffre bel et bien d'étalement urbain, sous des formes et à des degrés différents.

Le territoire a pu être scindé en 7 types distincts issus du calcul d'indicateurs de dimensions différentes, sur une période de 15 ans :

- Secteurs centraux situés qui se situent principalement à proximité du centre-ville.
- Secteurs denses abritant une forte concentration des habitations sur l'ensemble du territoire, plusieurs sont situés autour du centre-ville, mais leur proximité au centre-ville n'est pas une variable considérée pour les définir ou les repérer.
- Secteurs qui se concentrent localement sur eux-mêmes, la concentration des habitations augmente au sein du même territoire sans laisser place à des territoires vacants.
- Secteurs légèrement concentrés dont la définition est identique à celles des secteurs concentrés, mais avec plus de zones vacantes observées dans le territoire.
- Secteurs discontinus qui sont des secteurs construits avec des concentrations séparées par des zones vacantes (Leap Frog).
- Secteurs légèrement discontinus dont la définition est identique à celle des secteurs discontinus, mais avec moins de zones vacantes dans le territoire.
- Secteurs dispersés qui sont des secteurs aux constructions éparpillées dans l'espace considéré.

Des profils de croissance particuliers ont été attribués aux secteurs du territoire et permettent de visualiser l'évolution de l'étalement urbain.

L'étalement urbain a pu donc être caractérisé par des types distincts.

L'analyse de cette évolution entre 2001 et 2016 a démontré que les modifications que connaît le territoire en termes d'étalement sont assez légères. Peu de secteurs changent d'affectation à travers les années, si ce n'est que la Couronne Nord a tendance à se développer de manière plus étalée que la Couronne Sud.

Au niveau de la capacité routière offerte aux résidents d'un secteur, il a été constaté que pour une grande partie des secteurs, l'évolution en pourcentage de la capacité se fait plus rapidement que l'augmentation en pourcentage de la population. Ce constat, croisé à l'évolution de la demande, a permis de démontrer grâce à des calculs d'élasticité que la demande induite par l'augmentation de l'offre varie en fonction du type de secteurs.

L'évolution de la demande, grâce à l'analyse des données de l'enquête OD, a permis de démontrer que contrairement à l'intuition initiale, la consommation de VKT n'augmente pas systématiquement sur l'ensemble du territoire et ne dépend pas uniquement de l'éloignement du centre-ville. Des secteurs de la zone sud ont vu leur consommation de VKT baisser, baisse attribuée principalement à l'augmentation des parts de population non-mobile.

Les secteurs de type concentré se sont particulièrement distingués, en raison de l'élasticité négative observée pour certains secteurs et les valeurs des indicateurs de mobilité. Il s'agit des types ayant observé une baisse des distances moyennes de déplacement tout en ayant connu une hausse de la capacité routière offerte. Ces secteurs couvrent plus de 50% du territoire, mais n'abritent que 13% de l'ensemble de la population. Cela prouve que sur un pas de 5 ans, si des zones du territoire se concentrent sur elle-même, l'augmentation de l'offre routière ne contribue pas nécessairement à induire une consommation supplémentaire des VKT.

Les analyses et interprétations des impacts de l'étalement urbain sont nombreuses et chaque type de la typologie développée pourrait à lui seul constituer un cas d'étude. L'analyse des indicateurs de mobilité et d'accessibilité des résidents, tout en tenant compte de l'appartenance à un type d'étalement urbain, pourrait s'avérer utile et contribuer à la prise de décision, tant au niveau de l'anticipation de la demande induite que du développement urbain du territoire.

5.2 Contributions

Les contributions de cette recherche peuvent se présenter en 3 sections détaillant l'apport au niveau de la caractérisation de l'étalement urbain, du traitement des données de réseau routier et de l'impact de l'étalement urbain sur la demande en transport.

5.2.1 Estimation d'indicateurs d'étalement et développement d'une typologie

L'étalement urbain est un phénomène assez complexe à caractériser, pour Bhatta. (2010), plusieurs notions existent, mais elles varient en fonction des besoins des auteurs. La revue de littérature menée a permis de démontrer que plusieurs notions s'entrecroisent tout en se calculant à l'aide d'indicateurs différents. Cependant, à notre connaissance, aucune caractérisation universelle n'existe pour définir la nature d'un secteur. Frenkel et Orenstein (2011) ont clairement mentionné que pour un même territoire, deux indicateurs différents pourraient entraîner deux interprétations opposées.

L'une des contributions de cette recherche est donc d'avoir développé, grâce à une série d'indicateurs, une typologie d'étalement urbain ayant une interprétation simplifiée tout en considérant les diverses dimensions utilisées dans les définitions de l'étalement urbain. Cette typologie peut se prêter à d'autres études au niveau du territoire montréalais vu que plusieurs concepts ont servi d'intrants à son développement.

5.2.2 Évaluation du potentiel de différentes sources pour caractériser l'évolution de l'offre routière

Le traitement des données du réseau routier, au mieux de nos connaissances, a permis de mettre en évidence l'absence de cohérence historique entre les différentes bases de données explorées. Cette recherche a permis de mettre à l'épreuve plusieurs ensembles de données et de mettre en évidence les nombreuses limites associées à leur valorisation pour documenter et quantifier l'évolution de la capacité routière.

Il est clair qu'au fil des ans, les données gagnent en précision et en exhaustivité. Mais cet effort n'est pas accompagné par un maintien de la cohérence l'historique. Cela est d'autant plus frustrant lorsque l'on comprend qu'un nouveau réseau routier n'est généralement pas développé à partir de zéro, mais reprend bien le réseau d'avant. Il a été possible, pour cette recherche, de joindre

historiquement une maigre partie de certains réseaux grâce à leurs attributs (identifiants). Clairement, cela n'aurait pas été possible si le réseau le plus récent ne s'appuyait pas, du moins en partie, sur le réseau précédent. Il est donc dommage qu'un effort plus important ne soit pas consenti à assurer la construction d'un historique de données sur les réseaux apte à témoigner du niveau de capacité routier offert à travers le temps.

Cette recherche a donc contribué à amener un éclairage sur cet enjeu, tout en proposant des pistes et des algorithmes de jointure pouvant être améliorés.

Les fiches de secteurs générés ont pour objectif de capitaliser cet effort de jointure tout en aidant à mieux visualiser et repérer les cas particuliers. Des pistes pour une future amélioration des algorithmes et méthodologies de jointure devraient se manifester en analysant pas moins de 690 fiches générées pour le réseau Motrem et 690 pour le réseau Canvec.

5.2.3 Impact de l'étalement urbain sur la demande en transport

Au travers des résultats obtenus, cette recherche a également permis de mettre en lumière l'interaction inhérente entre l'effet de l'étalement urbain et la demande de transport (dont une part dite demande induite), l'analyse des secteurs concentrés a démontré que l'intuition selon laquelle les secteurs les plus éloignés du centre-ville consomment le plus de VKT ne s'avère pas totalement correcte. Si un secteur se concentre sur lui-même au fil des années, il s'agit plutôt du phénomène inverse qui est observé, même s'il est éloigné du centre-ville.

L'anticipation de la demande future pourrait alors bénéficier de ce constat. L'observation du schéma de développement résidentiel – et donc de la typologie d'étalement urbain - indiquerait une probable évolution (à la hausse ou à la baisse) de la demande en comparaison à l'évolution de l'offre routière.

Cette recherche a permis de démontrer également que pour les secteurs concentrés (qui représentent près de 50% du territoire de l'enquête OD), l'offre routière a connu l'une des plus fortes hausses alors qu'il s'agit des seuls secteurs où la distance moyenne de déplacement a observé une baisse. Le réseau routier local étant exclu de la quantification de l'offre, cette augmentation ne pourrait être totalement imputable au développement urbain intra secteurs. De plus, certains secteurs concentrés ont même vu leur consommation de VKT baisser. Il faudrait tout de même comprendre ici que ce constat ne prétend pas, et ne cherche pas, à remettre en cause les décisions de développement du territoire, mais l'objectif est de mettre plutôt l'accent sur le besoin d'analyser

plus en détail les décisions de mobilité des résidents de ces zones pour mieux anticiper et répondre à la demande future.

5.3 Limitations et perspectives

Cette recherche n'est pas exempte de limitations, et il faudrait toujours les considérer lors de l'interprétation des résultats obtenus.

L'une des premières limitations concerne la nature du découpage. Il a été possible de recréer un découpage fixe et assez fin du territoire sur une période de 15 ans (2001 à 2016), mais l'attribution de l'ensemble des variables calculées et étudiées reste tributaire de la précision des bases de données. Plusieurs données de sources différentes ont été croisées par secteur (nombre de bâtiments, nombre de logements, population, réseau routier, domicile des répondants de l'enquête OD...) et on a supposé ici que le degré de précision satisfait aux exigences de la jointure. Pour pallier un éventuel enjeu d'interprétation, plusieurs analyses ont tout de même été menées à un niveau plus agrégé (secteurs municipaux), cela a permis de pallier en grande partie l'impact de l'effet frontière du découpage en SR.

Au niveau du traitement du réseau routier, l'absence d'une jointure complète du réseau (83% joint) a entraîné des hypothèses sous-jacentes à la caractérisation de l'offre, on a supposé que les segments non joints ne modifieraient pas le sens d'évolution des capacités observées par secteur. Quant à l'affectation des capacités offertes, l'effet de l'offre des secteurs adjacents n'a pas été considéré : on suppose que les secteurs sont indépendants et on ne traite pas l'effet de l'attraction possible d'un segment routier situé dans des secteurs limitrophes. Le développement d'indicateurs et de bassins d'attraction pour la capacité offerte pourrait être une perspective d'amélioration intéressante pour cette caractérisation.

L'analyse de l'offre en transport s'est limitée au traitement du réseau routier; le réseau TC n'a pas été considéré dans cette recherche. Une des perspectives intéressantes serait d'analyser l'effet de présence et proximité de voies ferrées sur la distribution des types d'étalement par exemple.

Certains indicateurs n'ont pas pu être calculés vu l'absence de données nécessaires (géométrie historique des bâtiments par exemple). Il serait intéressant, si ces données peuvent être obtenues, d'explorer la valeur des indicateurs non calculés et de les croiser avec les résultats obtenus. Cela

permettrait éventuellement de raffiner ou d'obtenir une nouvelle typologie en combinant ou en ajoutant de nouveaux types d'étalement urbain.

Il a été possible de croiser l'évolution de trois sphères : étalement urbain, offre en transport et demande en transport, mais il ne s'agit nullement d'une analyse de cause à effet. Cela sera donc une perspective intéressante à explorer, notamment en envisageant de développer des modèles dits de différence en différence ou des modèles d'équations structurelles.

L'analyse des indicateurs de mobilité a permis de tirer d'intéressantes conclusions, mais le potentiel d'analyse reste conséquent si l'on considère la pléthore d'indicateurs de mobilité pouvant être calculés et mis en perspective avec la typologie d'étalement (marchabilité, accessibilité au TC...).

Cette recherche a amené un éclairage intéressant à la compréhension des impacts de l'étalement urbain, mais ne constitue qu'un premier pas dans le sens d'une compréhension plus complète des interactions avec l'offre et la demande en transport. Ce sujet est critique et plus sa compréhension sera avancée, meilleure sera l'anticipation de la demande en transport.

RÉFÉRENCES

- Gordon, D. L., Hindrichs, L., & Willms, C. (2018). Still Suburban? Growth in Canadian Suburbs 2006-2016. Council for Canadian Urbanism. Working Paper# 2.
- Observatoire Grand Montréal (2020), Le phénomène de l'urbanisation perimétropolitaine en progression au pourtour du Grand Montréal.
- Bhatta, B. (2010). Analysis of urban growth and sprawl from remote sensing data. Springer Science & Business Media.
- OECD (2018), Rethinking Urban Sprawl: Moving Towards Sustainable Cities, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264189881-en>.
- Galster G et al. (2001) Wrestling sprawl to the ground: Defining and Measuring an elusive concept Housing Policy Debate 12 (4): 681 717"
- Ewing, R., R. Pendall & D. Chen (2003) Measuring Sprawl and Its Transportation Impacts. Transportation Research Record, 1831, 175-183.
- Jaeger, J. A., & Schwick, C. (2014). Improving the measurement of urban sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland. Ecological indicators, 38, 294-308.
- Frenkel, A. & Orenstein, D. (2011). A pluralistic approach to defining and measuring urban sprawl. Urban remote sensing: monitoring, synthesis and modeling in the urban environment. Wiley-Blackwell, Chichester, 165-181.
- Rauber, Alice. (2017). Urban Sprawl Indicator Based on Weighted Accessibility Measure.
- Bertaud, A., & Malpezzi, S. (2003). The spatial distribution of population in 48 world cities: Implications for economies in transition. Center for urban land economics research, University of Wisconsin, 32(1), 54-55."
- Frenkel, A., & Ashkenazi, M. (2008). Measuring Urban Sprawl: How Can We Deal with It? Environment and Planning B: Planning and Design, 35(1), 56–79. <https://doi.org/10.1068/b32155>
- Ewing, R., Hamidi, S., Gallivan, F., Nelson, A. C., & Grace, J. B. (2014). Structural equation models of VMT growth in US urbanised areas. Urban Studies, 51(14), 3079-3096.

- Abe, R., & Axhausen, K. W. (2018). Impact of Major Road Supply on Individual Travel Time Expenditure: An Exploration with a 30-Year Variation of Infrastructure and Travel. *Transportation Research Record*, 2672(3), 56-68.
- Noland, R. B. (2001). Relationships between highway capacity and induced vehicle travel. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(1), 47-72.
- Melo, P. C., Graham, D. J., & Canavan, S. (2012). Effects of road investments on economic output and induced travel demand: evidence for urbanized areas in the United States. *Transportation research record*, 2297(1), 163-171.
- Gorham, R. (2009). Demystifying induced travel demand. The Ministry.
- Volker, J. M., Lee, A. E., & Handy, S. (2020). Induced vehicle travel in the environmental review process. *Transportation Research Record*, 2674(7), 468-479.
- He, N., & Zhao, S. (2015). Induced traffic in China: Elasticity models with panel data. *Journal of Urban Planning and Development*, 141(4), 04014046.
- Cervero, R., & Hansen, M. (2002). Induced travel demand and induced road investment: A simultaneous equation analysis. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 36(3), 469-490.
- Massey, D. S., & Denton, N. A. (1988). The dimensions of residential segregation. *Social forces*, 67(2), 281-315.
- Jaeger, J. A., Bertiller, R., Schwick, C., Cavens, D., & Kienast, F. (2010). Urban permeation of landscapes and sprawl per capita: New measures of urban sprawl. *Ecological Indicators*, 10(2), 427-441.
- Singh, A. C., Astroza, S., Garikapati, V. M., Pendyala, R. M., Bhat, C. R., & Mokhtarian, P. L. (2018). Quantifying the relative contribution of factors to household vehicle miles of travel. *Transportation research part D: transport and environment*, 63, 23-36.
- Ewing, R., & Cervero, R. (2001). Travel and the built environment: a synthesis. *Transportation research record*, 1780(1), 87-114.
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation research part D: Transport and environment*, 2(3), 199-219.

Brownstone, D. (2008). Key relationships between the built environment and VMT. Transportation Research Board, 7.

BIBLIOGRAPHIE

- Jaeger, J. A., Bertiller, R., Schwick, C., & Kienast, F. (2010). Suitability criteria for measures of urban sprawl. *Ecological indicators*, 10(2), 397-406.
- Jaeger, J. A., Bertiller, R., Schwick, C., Cavens, D., & Kienast, F. (2010). Urban permeation of landscapes and sprawl per capita: New measures of urban sprawl. *Ecological Indicators*, 10(2), 427-441.
- Schwick, C., Jaeger, J., & Kienast, F. (2011). Mesurer et éviter l'étalement urbain. Institut fédéral de recherches WSL.
- Poelmans, L., Uljee, I., Clymans, W., & Hallot, E. (2019). Long-term simulation of urban development in support of spatial planning policy. *Dynamiques regionales*, (2), 57-83.
- Nazarnia, N., Schwick, C., Kopecky, M., Soukup, T., Orlitova, E., Kienast, F., & Jaeger, J. A. G. (2018). Urban Sprawl Metrics (USM) Toolset–User Manual. 8 September 2016.
- Nazarnia, N., Schwick, C., & Jaeger, J. A. (2016). Accelerated urban sprawl in Montreal, Quebec City, and Zurich: Investigating the differences using time series 1951–2011. *Ecological indicators*, 60, 1229-1251.
- Hamidi, S., Ewing, R., Preuss, I., & Dodds, A. (2015). Measuring sprawl and its impacts: An update. *Journal of Planning Education and Research*, 35(1), 35-50.
- Cutsinger, J., Galster, G., Wolman, H., Hanson, R., & Towns, D. (2005). Verifying the multi-dimensional nature of metropolitan land use: Advancing the understanding and measurement of sprawl. *Journal of Urban Affairs*, 27(3), 235-259.
- Schwick, C., Jaeger, J., & Kienast, F. (2011). Mesurer et éviter l'étalement urbain. Institut fédéral de recherches WSL.
- Jaeger, J. A., & Schwick, C. (2014). Improving the measurement of urban sprawl: Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland. *Ecological indicators*, 38, 294-308.
- Jaeger, J. A., Bertiller, R., Schwick, C., & Kienast, F. (2010). Suitability criteria for measures of urban sprawl. *Ecological indicators*, 10(2), 397-406.
- Banai, R., & DePriest, T. (2010). Urban sprawl: Definitions, data, methods of measurement, and environmental consequences. *Education*, 7.

- Gordon, D. L., & Janzen, M. (2013). Suburban nation? Estimating the size of Canada's suburban population. *Journal of Architectural and Planning Research*, 197-220.
- Habibi, S., & Asadi, N. (2011). Causes, results and methods of controlling urban sprawl. *Procedia Engineering*, 21, 133-141.
- Yaïche, T. (2012). La consommation d'espace par l'urbanisation: panorama de méthodes d'évaluation. du document: Urbanisation et consommation de l'espace, une question de mesure, 33.
- Peiser, R. B. (1984). Does it pay to plan suburban growth?. *Journal of the American Planning Association*, 50(4), 419-433.
- Gao, Z., Kii, M., Nonomura, A., & Nakamura, K. (2019). Urban expansion using remote-sensing data and a monocentric urban model. *Computers, environment and urban systems*, 77, 101152.
- Hymel, K. (2019). If you build it, they will drive: Measuring induced demand for vehicle travel in urban areas. *Transport policy*, 76, 57-66.
- Perveen, S., Kamruzzaman, M., & Yigitcanlar, T. (2019). What to assess to model the transport impacts of urban growth? A Delphi approach to examine the space–time suitability of transport indicators. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(8), 597-613.
- Garcia-López, M. À. (2019). All roads lead to Rome... and to sprawl? Evidence from European cities. *Regional Science and Urban Economics*, 79, 103467.
- Zhao, P. (2010). Sustainable urban expansion and transportation in a growing megacity: Consequences of urban sprawl for mobility on the urban fringe of Beijing. *Habitat International*, 34(2), 236-243.
- Ewing, R., Tian, G., & Lyons, T. (2018). Does compact development increase or reduce traffic congestion?. *Cities*, 72, 94-101.
- Tellier, L. N. (2020). Characterizing urban form by means of the Urban Metric System. *Land Use Policy*, 104672.
- Lee, D. B., Klein, L. A., & Camus, G. (1999). Induced Traffic and Induced Demand. *Transportation Research Record*, 1659(1), 68–75. <https://doi.org/10.3141/1659-09>

- Ewing, R., Hamidi, S., Gallivan, F., Nelson, A. C., & Grace, J. B. (2014). Structural equation models of VMT growth in US urbanised areas. *Urban Studies*, 51(14), 3079-3096.
- Abe, R., & Axhausen, K. W. (2018). Impact of Major Road Supply on Individual Travel Time Expenditure: An Exploration with a 30-Year Variation of Infrastructure and Travel. *Transportation Research Record*, 2672(3), 56-68.
- Volker, J. M., Lee, A. E., & Handy, S. (2020). Induced vehicle travel in the environmental review process. *Transportation Research Record*, 2674(7), 468-479.
- Openshaw, S. (1984). Ecological fallacies and the analysis of areal census data. *Environment and planning A*, 16(1), 17-31.
- Zhao, G., Zheng, X., Yuan, Z., & Zhang, L. (2017). Spatial and temporal characteristics of road networks and urban expansion. *Land*, 6(2), 30.
- Gervasoni, L., Bosch, M., Fenet, S., & Sturm, P. (2017, July). Calculating spatial urban sprawl indices using open data. In 15th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management.
- Wang, S., Yu, D., Kwan, M. P., Zhou, H., Li, Y., & Miao, H. (2019). The evolution and growth patterns of the road network in a medium-sized developing city: a historical investigation of changchun, China, from 1912 to 2017. *Sustainability*, 11(19), 5307.

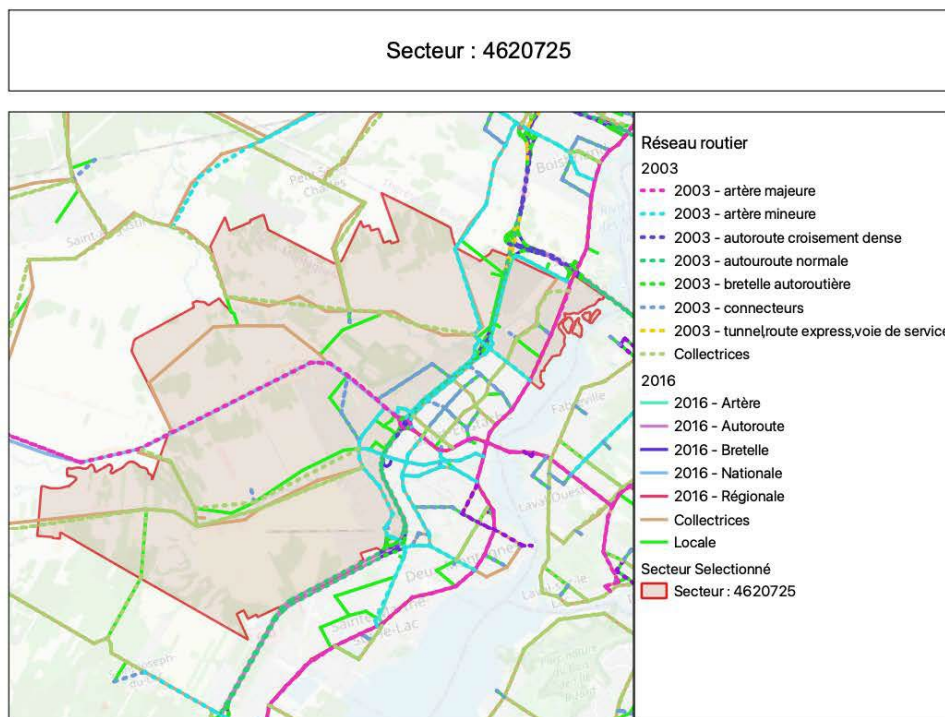
ANNEXE A DÉTAILS DES VARIABLES DE L'INDEX D'EWING (2003)

<p>1 index qui est la somme (non pondérée) de 4 facteurs principaux composés de 22 variables au total :</p> <p>facteur de densité</p>	<p>combinaison de 7 facteurs :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Densité de population 2. Pourcentage de la population vivant à des densités inférieures à 1 500 personnes par km² (densité de banlieue). 3. Pourcentage de la population vivant à des densités supérieures à 12 500 personnes par km², une densité urbaine qui commence à être favorable au transport en commun. 4. Densité estimée au centre de la zone métropolitaine dérivée d'une fonction de densité exponentielle négative. 5. Densité de population en zone urbaine. 6. Taille moyenne des lots occupés par les habitations unifamiliales. 7. Densité pondérée de tous les centres de population dans une région métropolitaine.
<p>Facteur de mixité d'usage (Neighborhood mix of homes, jobs, and services)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. pourcentage de résidents ayant des entreprises ou des institutions à proximité de leur habitation 2. pourcentage de résidents avec des commerces de quartier dans un rayon de 1 km 3. pourcentage de résidents avec une école primaire publique à moins de 1 km. 4. ratio nombre d'emplois- nombre de résidents 5. ratio de population équivalent au nombre d'emplois-NB résident 6. indicateur d'entropie des services offerts aux résidents.
<p>Facteur de centralité</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. coefficient de variation de la densité de population entre les secteurs de recensement (écart-type divisé par la densité moyenne) 2. gradient de densité (taux de déclin de la densité avec la distance par rapport au centre de la zone métropolitaine) 3. pourcentage de la population métropolitaine à moins de 3 km du centre-ville 4. pourcentage de la population métropolitaine à plus de 10 km du centre-ville. 5. pourcentage de la population métropolitaine se rapportant aux centres ou sous centres au sein du même secteur. 6. rapport de la densité pondérée des centres de population au sein du même secteur au centre de densité le plus élevé de la région.
<p>Facteur d'accessibilité routière</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. longueur moyenne approximative des "blocs" de la partie urbaine de la zone métropolitaine 2. taille moyenne des blocs en km² carrés (>1 km²) 3. pourcentage de petits blocs (< 0,01 km²)

ANNEXE B EXEMPLE D'UNE FICHE MOTREM – EMPLACEMENT

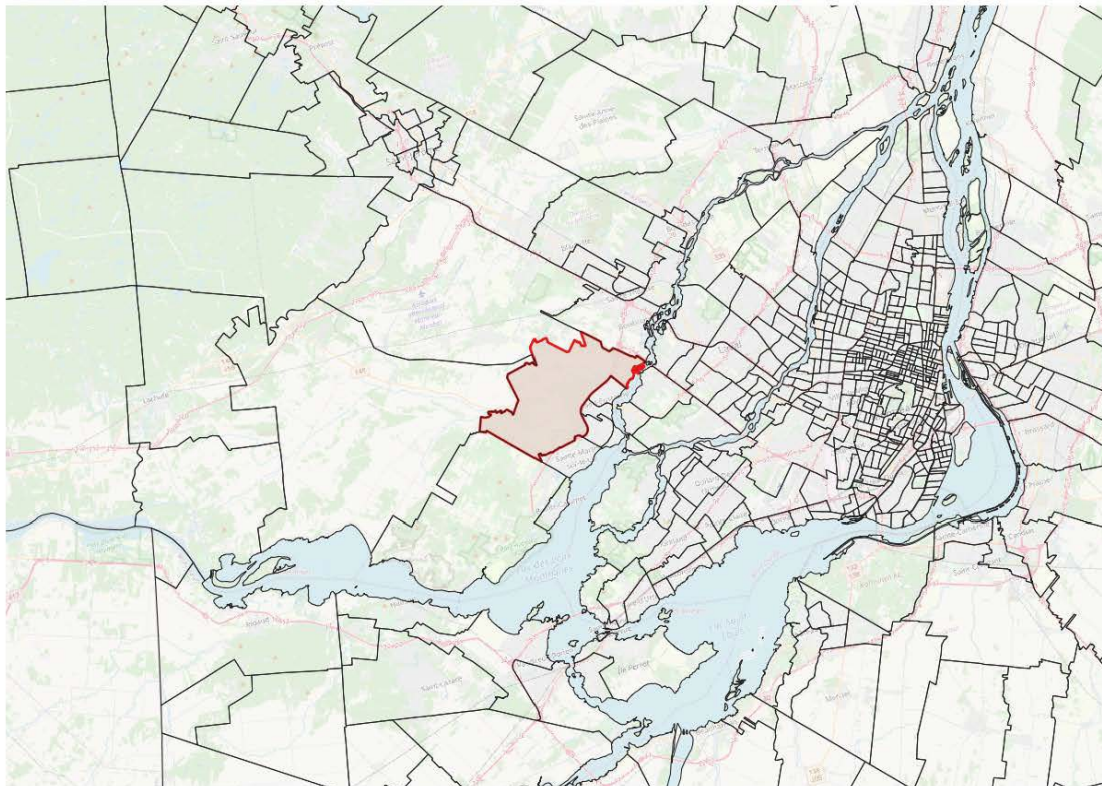
Fiche du Secteur 4620725

Emplacement :



ANNEXE C EXEMPLE D'UNE FICHE MOTREM – POSITIONNEMENT

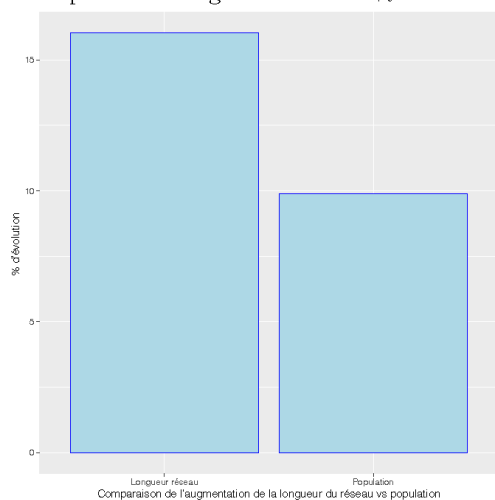
Positionnement dans le territoire OD :



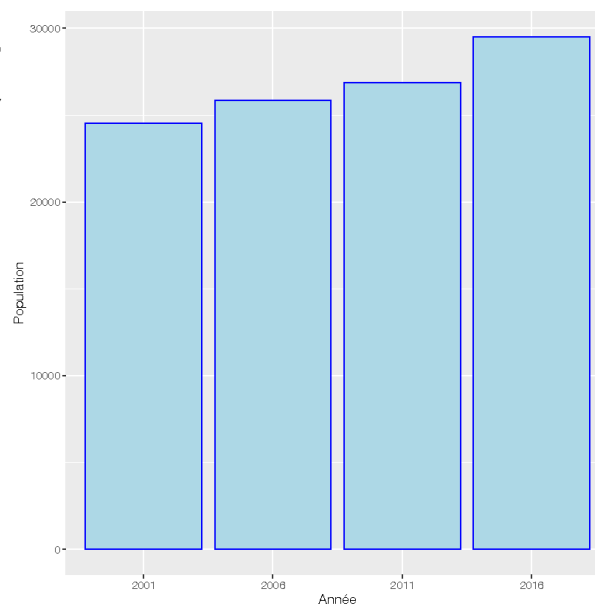
ANNEXE D EXEMPLE D'UNE FICHE MOTREM - STATISTIQUES

Statistiques :

La surface du secteur est de **88.58** Km²
 La longueur du réseau en **2003** est de 166.75 Km
 La longueur du réseau en **2016** est de 193.47 Km
 La longueur du réseau a augmenté de 16.02 %
 La Population a augmenté de 9.89 %

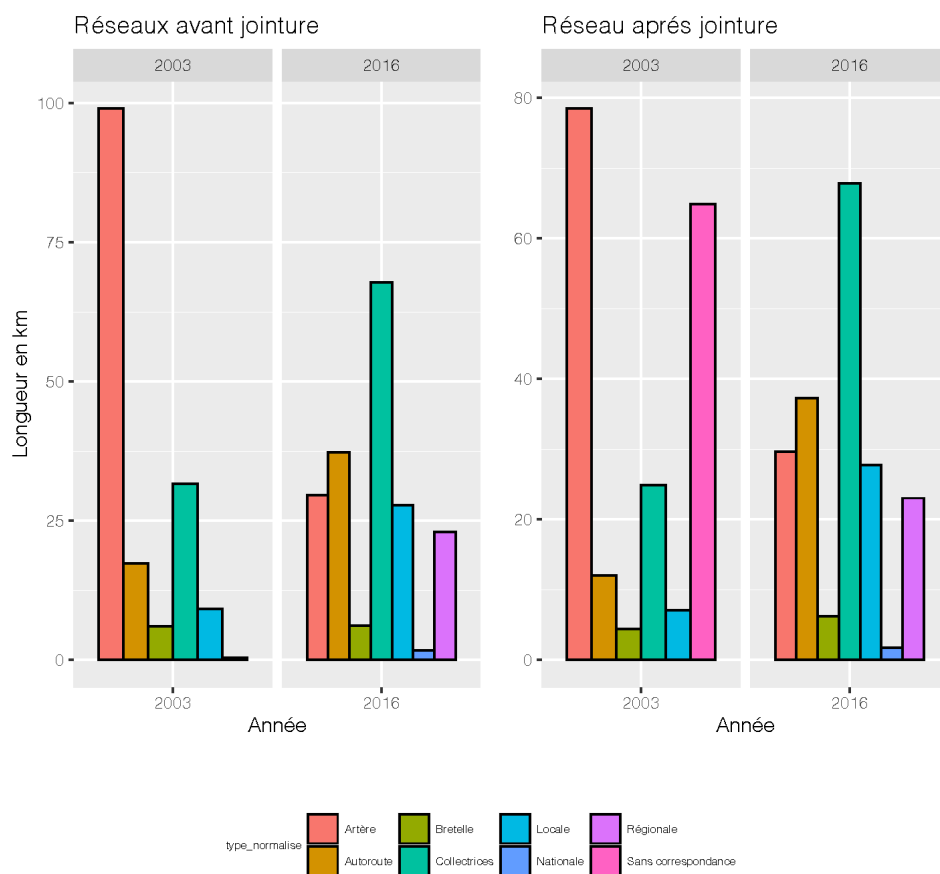


Population :



ANNEXE E EXEMPLE D'UNE FICHE MOTREM – COMPARATIF DU RÉSEAU

Réseau avec normalisation des Types:



ANNEXE F EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC - EMPLACEMENT

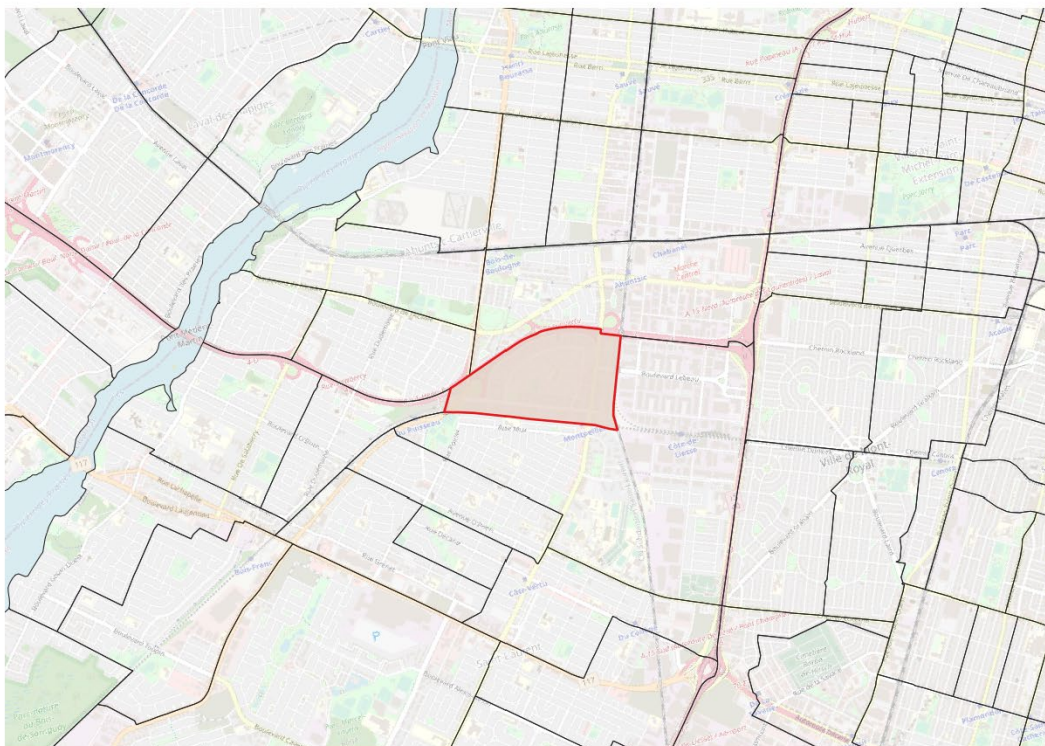
Fiche du Secteur 4620421

Emplacement :



ANNEXE G EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC – POSITIONNEMENT

Positionnement dans le territoire OD :

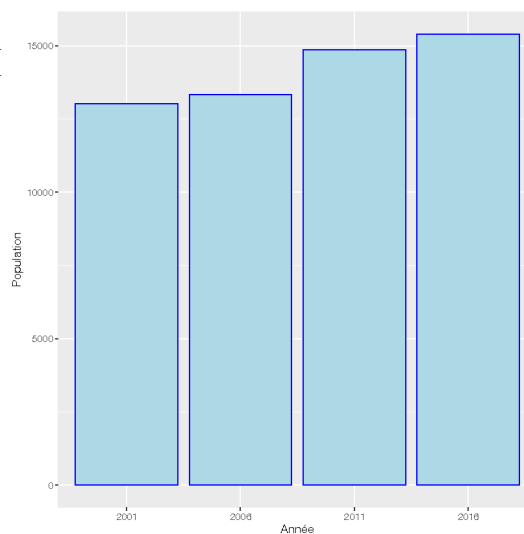


ANNEXE H EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC - STATISTIQUES

Statistiques :

La surface du secteur est de **0.97** Km²
 La longueur du réseau en **2009** est de 18.72 Km
 La longueur du réseau en **2015** est de 19.91 Km
 La longueur du réseau a augmenté de 6.38 %
 La Population a augmenté de 3.6 %

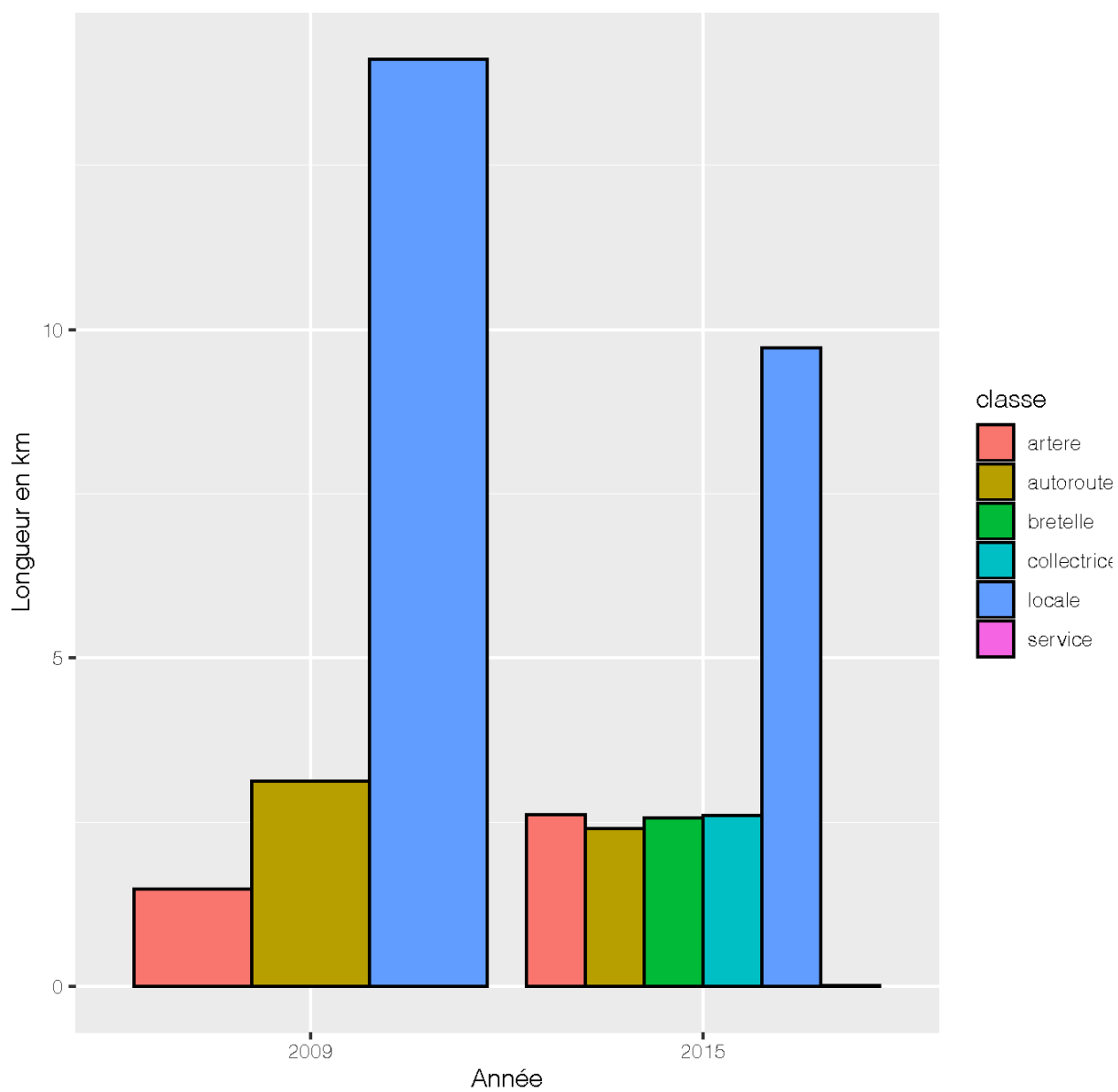
Population :



ANNEXE I EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC – RÉSEAU

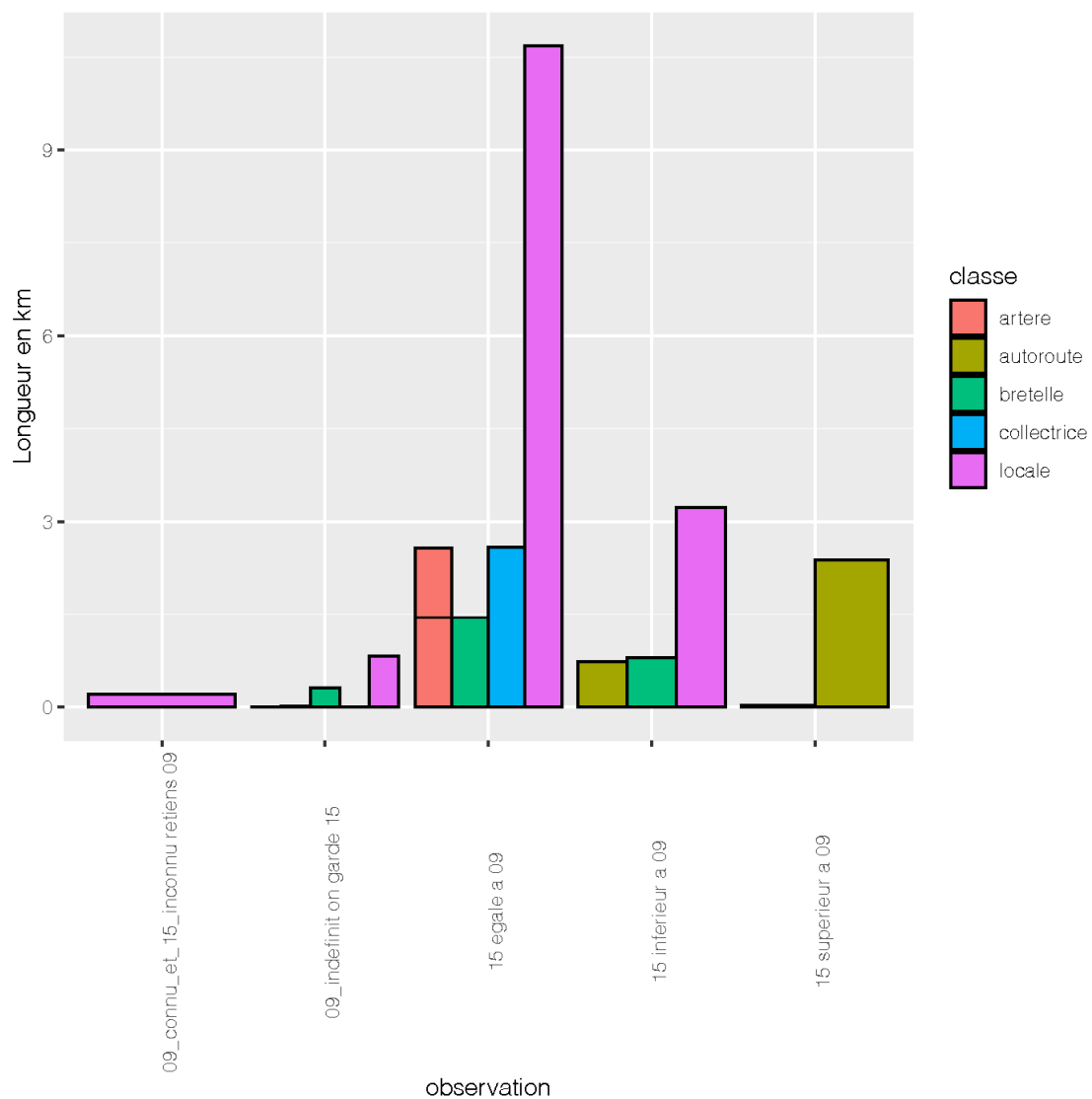
composition du réseau :

Réseaux du secteur : 4620421



ANNEXE J EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC – NOMBRE DE VOIES

analyse du nombre de voies:

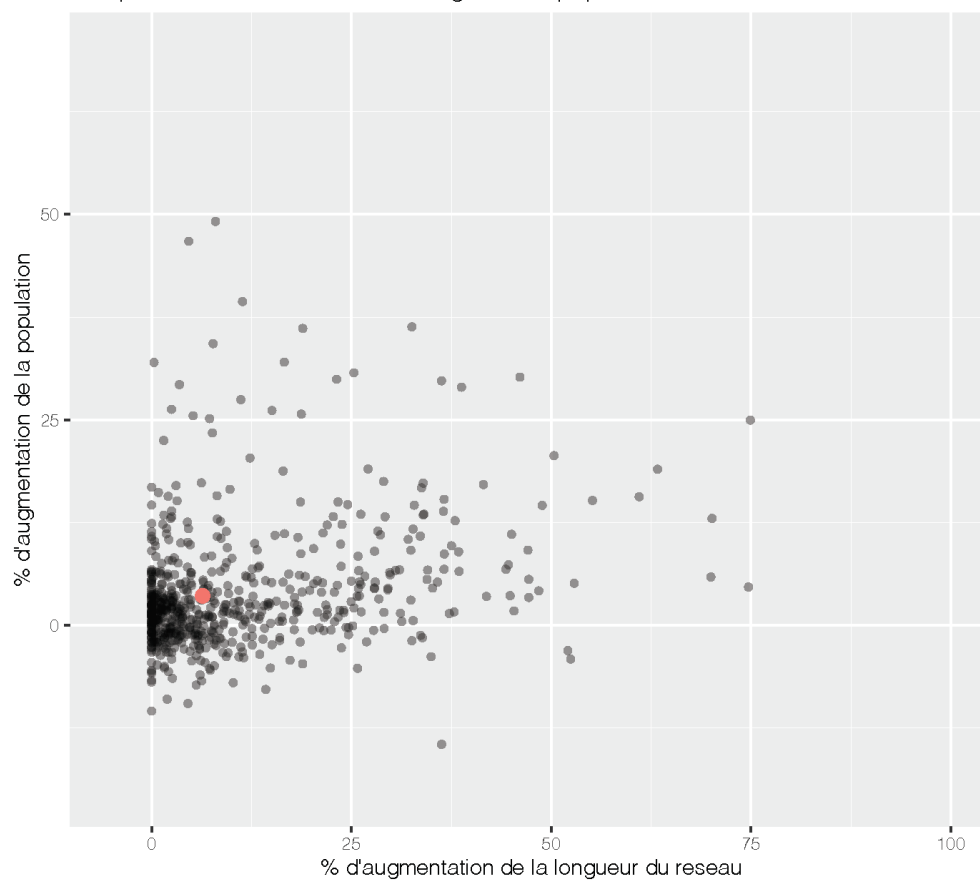


ANNEXE K EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC – ÉVOLUTION DE LA LONGUEUR DU RÉSEAU

evolution du réseau:

*Longueur :

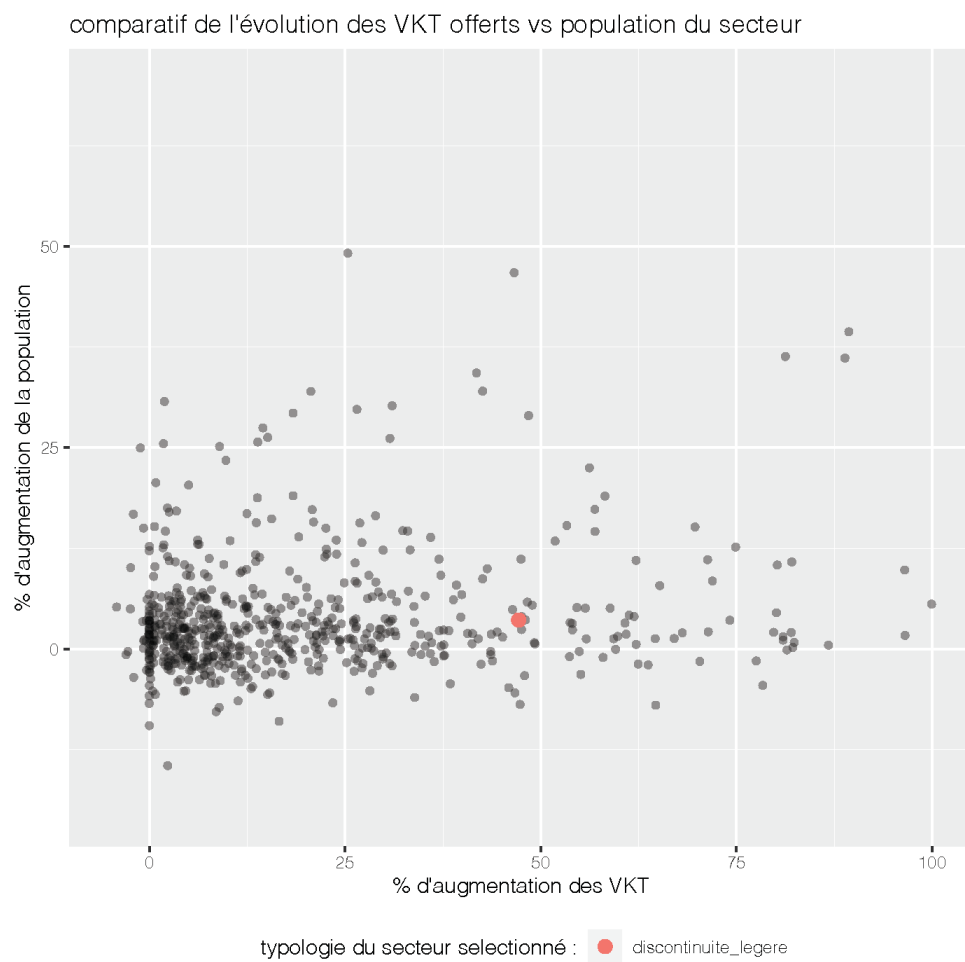
comparatif de l'évolution de la longueur vs population du secteur



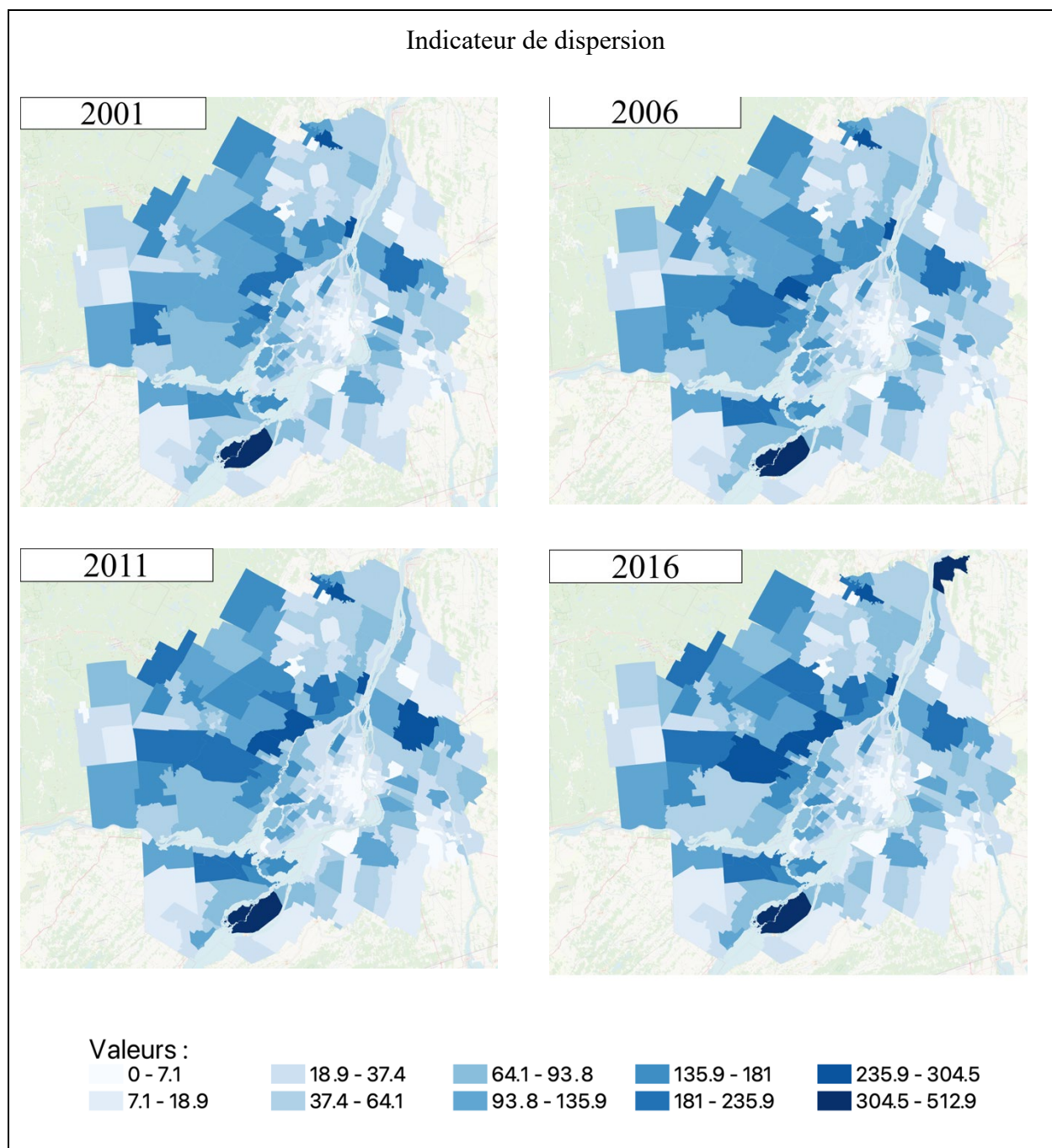
typologie du secteur sélectionné : ● discontinuite_legere

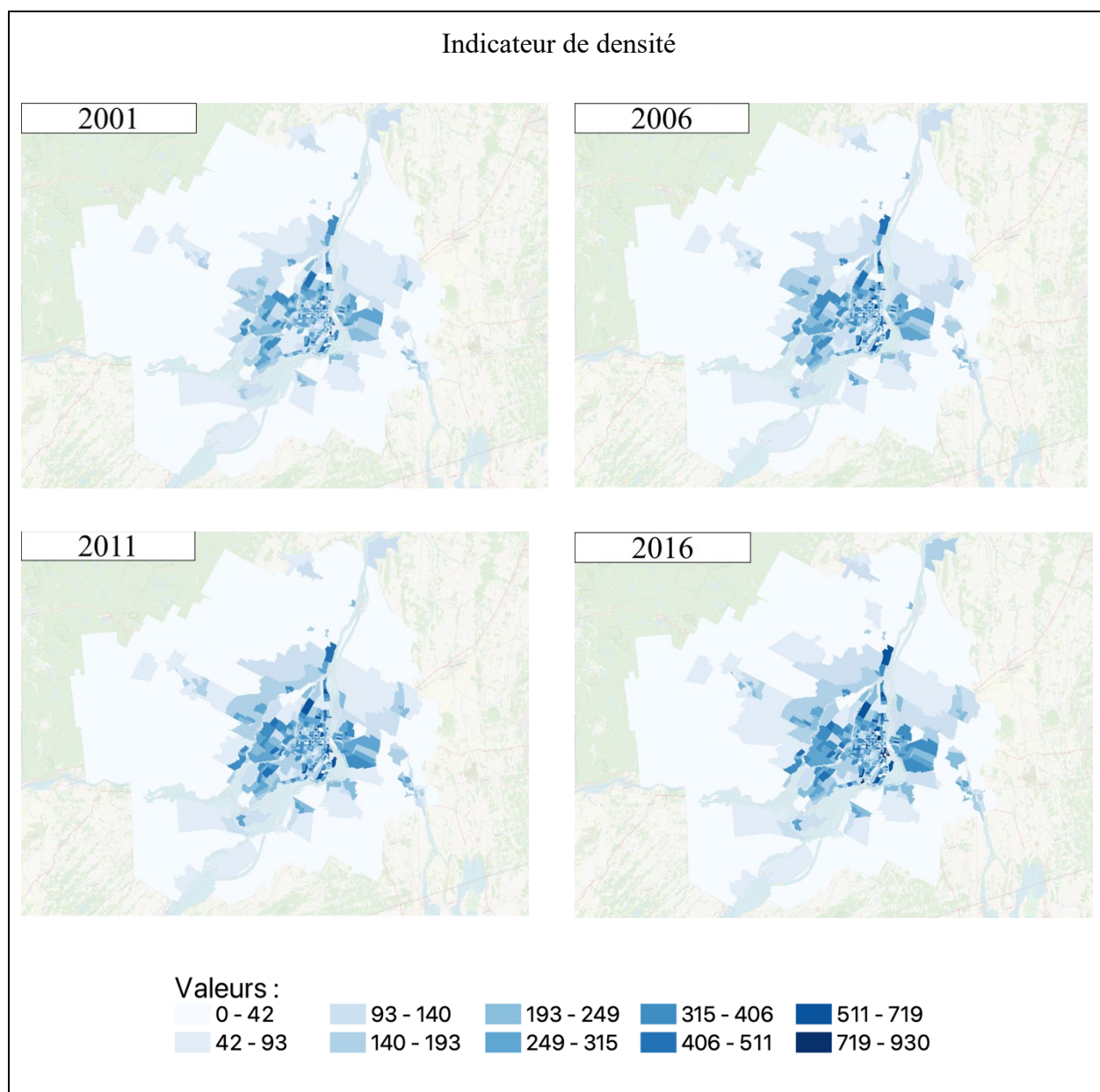
*VKT :

ANNEXE L EXEMPLE DÉTAILLÉ D'UNE FICHE CANVEC – ÉVOLUTION DES VKT VS POPULATION

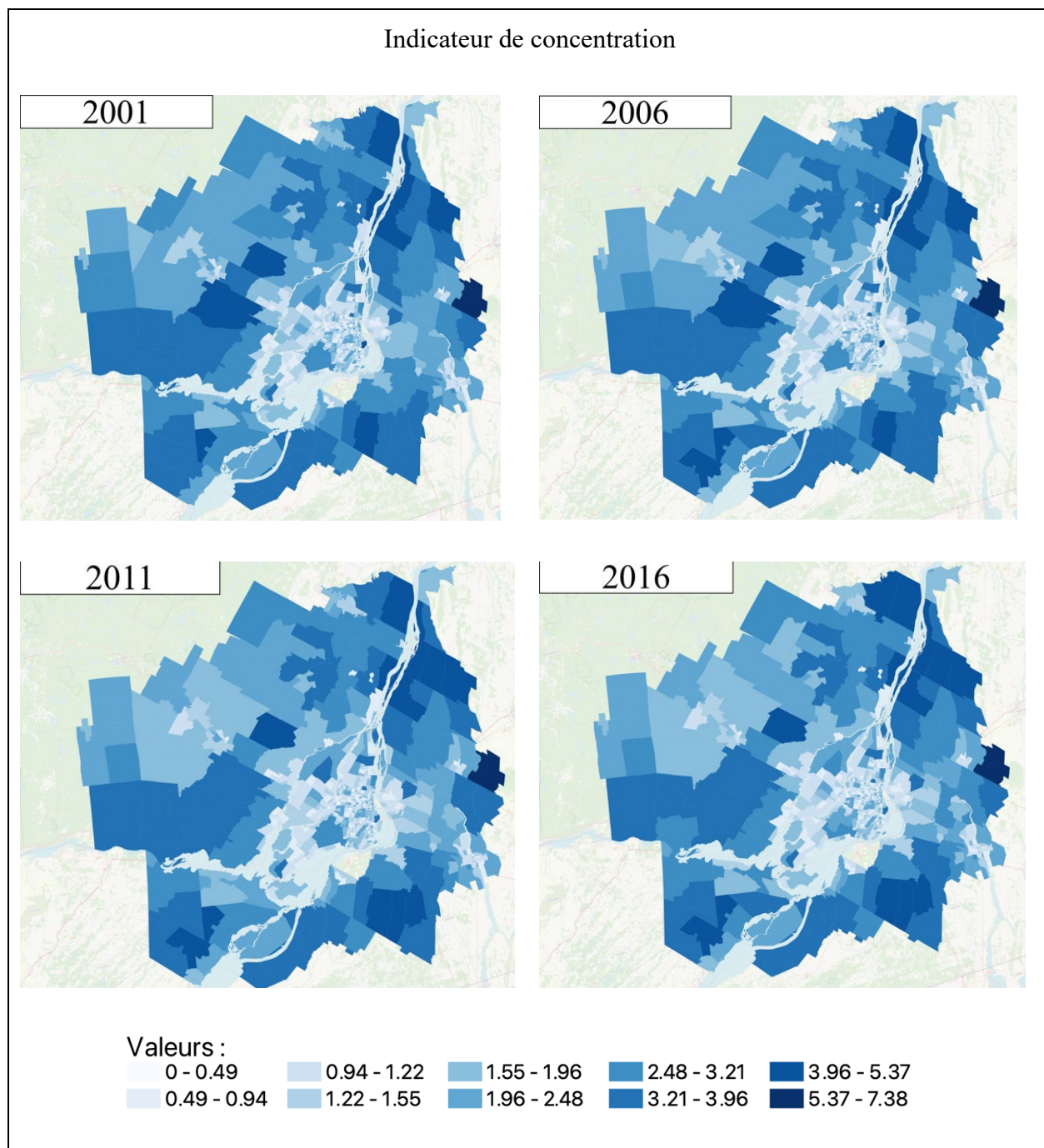


ANNEXE M VALEURS DE L'INDICATEUR DE DISPERSION PAR ANNÉE

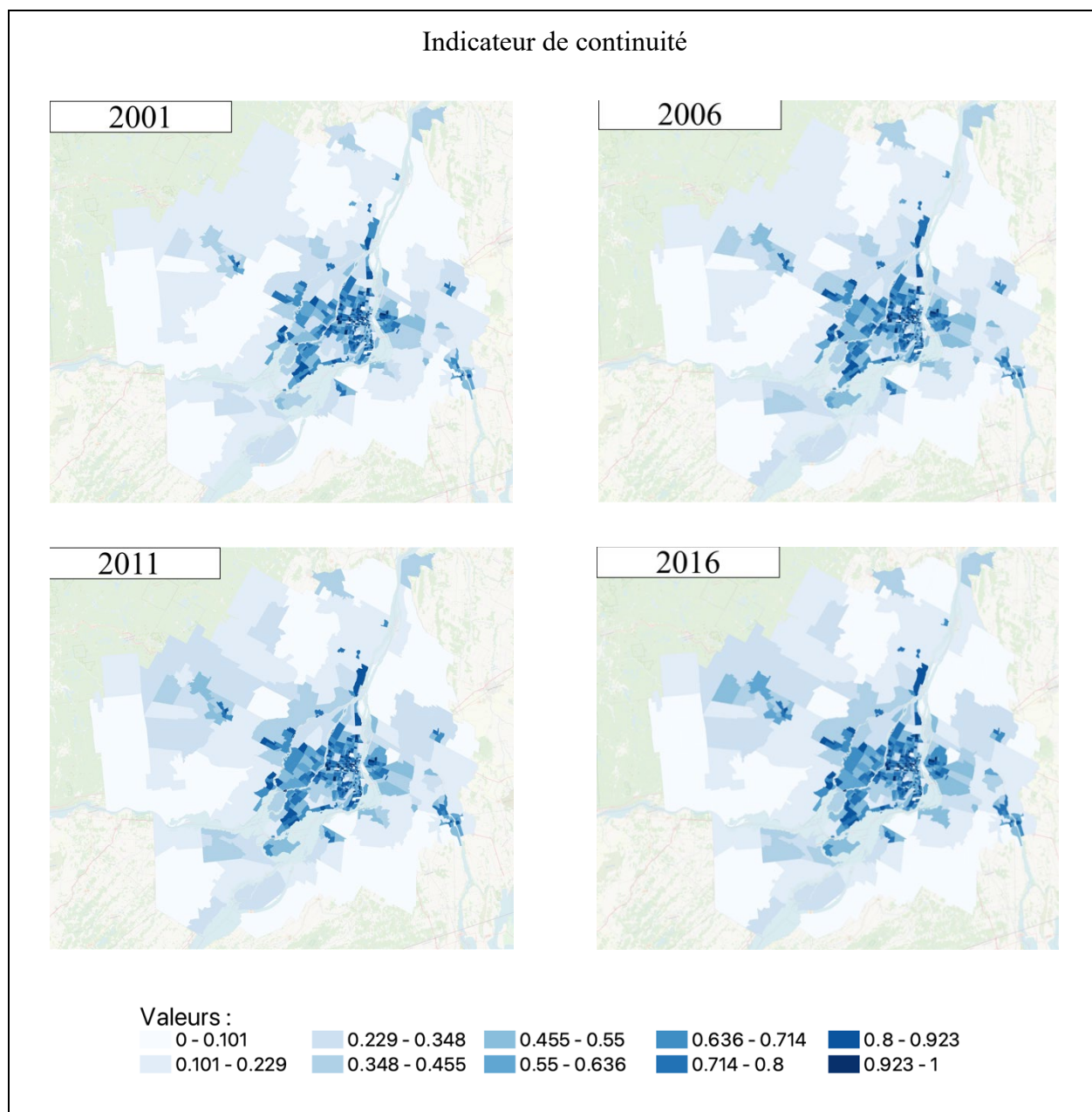


ANNEXE N VALEURS DE L'INDICATEUR DE DENSITÉ PAR ANNÉE

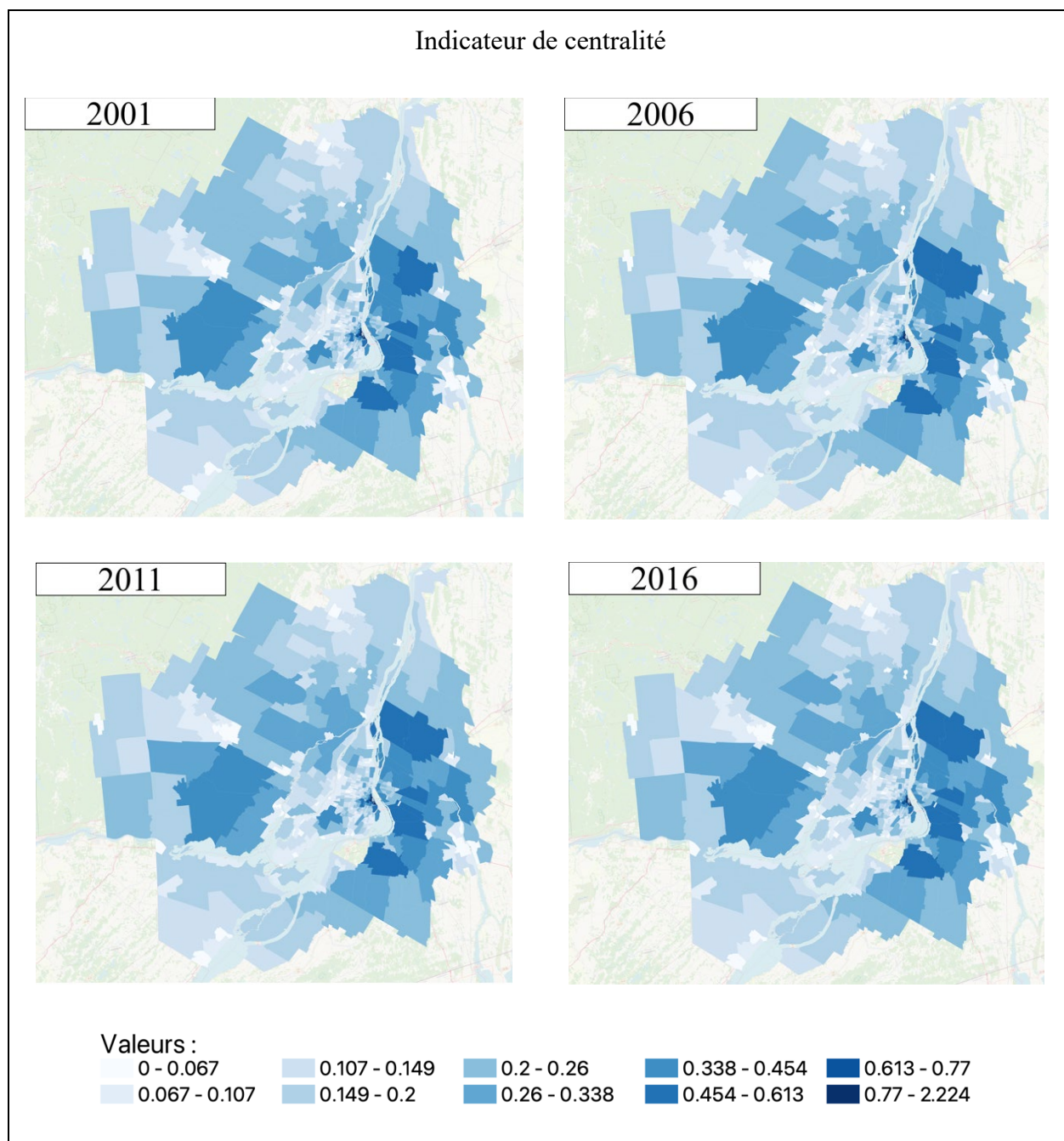
ANNEXE O VALEURS DE L'INDICATEUR DE CONCENTRATION PAR ANNÉE



ANNEXE P VALEURS DE L'INDICATEUR DE CONTINUITÉ PAR ANNÉE



ANNEXE Q VALEURS DE L'INDICATEUR DE CENTRALITÉ PAR ANNÉE



ANNEXE R STATISTIQUES PAR TYPOLOGIE

Statistiques	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
	capacité offerte	2013	2,17E+06	5,38E+06	5,18E+06	1,49E+06	6,90E+05	1,35E+06	4,05E+06
		2018	2,86E+06	6,91E+06	5,33E+06	2,21E+06	8,14E+05	1,50E+06	4,84E+06
		evo. %	31,59	28,48	2,84	48,76	18,06	11,41	19,39
	Nombre de secteurs	2013	9,00	25,00	24,00	13,00	9,00	12,00	19,00
		2018	9,00	26,00	21,00	15,00	9,00	12,00	19,00
		evo. %	0,00	4,00	-12,50	15,38	0,00	0,00	0,00
	Superficie	2013	335,61	5 005,95	2 377,40	201,29	83,32	195,17	1 458,59
		2018	335,61	5 098,53	1 997,94	240,22	83,32	195,25	1 706,45
		evo. %	0,00	1,85	-15,96	19,34	0,00	0,04	16,99
	Part de la superficie totale	2013	3,45	51,49	24,45	2,07	0,86	2,01	15,00
		2018	3,45	52,44	20,55	2,47	0,86	2,01	17,55
		evo. %	0,00	1,85	-15,96	19,34	0,00	0,04	16,99

ANNEXE S VARIABLES DE DÉMOGRAPHIE PAR TYPOLOGIE

démographie	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
	population	2013	5,00E+05	5,66E+05	8,47E+05	8,90E+05	2,23E+05	4,21E+05	7,62E+05
		2018	5,24E+05	6,12E+05	8,78E+05	9,90E+05	2,25E+05	4,30E+05	7,98E+05
		evo. %	4,73	8,24	3,68	11,20	1,11	2,25	4,79
	part de la pop adulte	2013	80,05	78,60	80,01	81,58	82,04	80,66	77,05
		2018	80,09	79,00	80,15	81,60	82,23	80,73	77,61
		evo. %	0,05	0,52	0,16	0,02	0,24	0,08	0,72
	part pop permis	2013	66,30	72,32	67,99	63,38	69,84	66,14	72,43
		2018	67,68	73,20	69,05	64,83	70,78	67,44	73,07
		evo. %	2,07	1,22	1,56	2,29	1,34	1,97	0,89
	part pop temps plein	2013	41,00	44,28	40,89	39,73	44,30	41,58	43,87
		2018	41,44	43,90	41,25	41,03	44,28	42,29	44,33
		evo. %	1,06	-0,85	0,86	3,28	-0,03	1,71	1,05
	part non mobiles	2013	15,10	16,48	16,94	17,06	14,70	16,10	14,77
		2018	15,78	16,19	16,69	16,69	13,69	15,91	15,42
		evo. %	4,49	-1,79	-1,44	-2,18	-6,87	-1,19	4,41

ANNEXE T INDICATEUR DE MOBILITÉ PAR TYPOLOGIE POUR AC ET AP

	mode	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
indicateurs de mobilité	Tous	distance moyenne	2013	8,48	16,86	11,46	7,60	8,24	8,87	14,63
			2018	9,34	16,05	11,86	8,59	9,55	9,59	15,12
	AC	distance moyenne	2013	11,28	21,42	15,02	10,34	11,98	10,94	17,35
			2018	12,26	20,49	15,31	11,67	14,02	12,01	18,31
			evo. %	8,67	-4,34	1,96	12,91	17,03	9,77	5,52
		part modale	2013	48,47	62,95	55,44	44,16	42,92	51,98	65,47
			2018	49,55	63,64	56,77	44,24	42,29	51,72	67,49
			evo. %	2,23	1,11	2,41	0,19	-1,47	-0,50	3,08
	AP	distance moyenne	2013	8,40	17,67	12,14	8,16	9,15	8,26	13,48
			2018	8,84	15,44	11,26	8,82	11,24	8,94	12,72
			evo. %	5,23	-12,58	-7,24	8,16	22,86	8,24	-5,64
		part modale	2013	12,20	12,40	12,65	11,36	10,54	12,78	13,66
			2018	12,18	11,69	12,28	10,66	9,81	13,00	12,95
			evo. %	-0,24	-5,76	-2,90	-6,18	-6,93	1,71	-5,17

ANNEXE U INDICATEUR DE MOBILITÉ PAR TYPOLOGIE POUR MV ET AU

	mode	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
indicateurs de mobilité	Tous	distance moyenne	2013	9,17	14,69	10,95	8,78	8,33	10,48	22,82
			2018	10,11	14,49	11,69	9,57	9,30	10,62	20,83
			evo. %	10,25	-1,33	6,83	8,95	11,71	1,36	-8,70
		part modale	2013	19,02	5,96	13,08	21,20	16,43	17,05	3,61
			2018	19,63	6,61	13,68	22,76	18,10	17,53	3,83
			evo. %	3,21	10,94	4,58	7,35	10,18	2,84	6,06
	MV	distance moyenne	2013	1,62	1,53	1,56	1,68	1,86	1,96	1,79
			2018	2,99	3,20	2,66	3,24	2,60	2,92	3,75
			evo. %	84,05	108,84	70,66	92,83	39,35	49,03	109,86
		part modale	2013	12,81	8,25	10,63	16,42	22,68	10,20	6,04
			2018	12,78	8,84	10,47	17,63	23,85	11,00	5,59
			evo. %	-0,27	7,08	-1,44	7,34	5,14	7,87	-7,42
	AU	distance moyenne	2013	8,93	15,38	10,99	7,98	11,47	9,73	14,64
			2018	12,90	18,26	17,17	13,53	16,29	14,38	16,05
			evo. %	44,52	18,71	56,21	69,40	42,13	47,82	9,61
		part modale	2013	7,50	10,44	8,21	6,85	7,44	7,99	11,21
			2018	5,87	9,22	6,80	4,71	5,96	6,75	10,13
			evo. %	-21,70	-11,69	-17,20	-31,26	-19,84	-15,57	-9,65

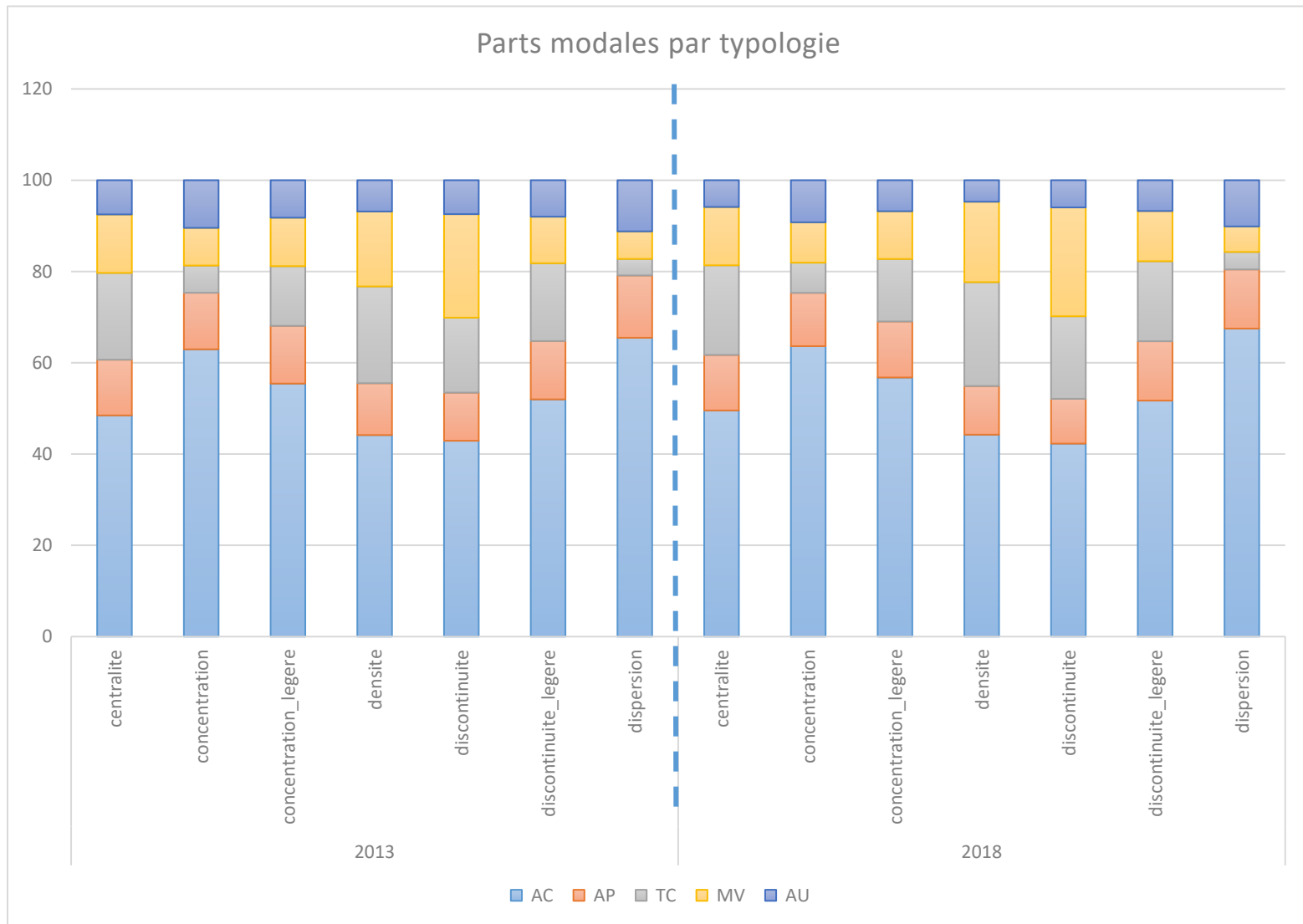
**ANNEXE V INDICATEURS DE MOBILITÉ – MOTIFS DE DÉPLACEMENT (TRAVAIL, ÉTUDE,
RETOUR AU DOMICILE) PAR TYPOLOGIE**

motif	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
Travail	distance moyenne	2013	13,57	25,62	18,00	11,79	13,07	13,71	23,28
		2018	14,21	24,45	18,35	12,78	13,47	14,48	23,95
		evo. %	4,70	-4,58	1,96	8,36	3,11	5,64	2,85
	Nb depl. Moy	2013	1,18	1,22	1,17	1,19	1,24	1,18	1,19
		2018	1,12	1,15	1,12	1,13	1,22	1,13	1,15
		evo. %	-5,02	-5,38	-4,09	-5,09	-1,38	-4,13	-3,71
	Part du motif	2013	18,08	19,42	18,05	17,82	18,19	18,11	19,03
		2018	18,39	19,65	18,51	18,30	18,86	18,21	19,68
		evo. %	1,75	1,19	2,52	2,72	3,71	0,53	3,43
Retour au domicile	distance moyenne	2013	9,43	19,25	13,08	8,56	9,13	9,87	16,58
		2018	10,41	18,28	13,34	9,53	10,54	10,54	17,08
		evo. %	10,33	-5,01	2,03	11,25	15,53	6,73	3,01
	Nb depl. Moy	2013	1,47	1,44	1,45	1,47	1,54	1,46	1,43
		2018	1,43	1,36	1,39	1,43	1,49	1,44	1,39
		evo. %	-2,35	-5,08	-4,17	-2,76	-3,57	-1,29	-2,88
	Part du motif	2013	43,25	43,28	42,99	43,18	42,93	42,91	43,11
		2018	43,72	43,81	43,75	43,27	43,07	43,34	43,84
		evo. %	1,09	1,22	1,76	0,21	0,35	0,98	1,72
Étude	distance moyenne	2013	6,70	13,87	9,33	6,54	7,38	8,12	12,34
		2018	8,40	12,89	9,23	7,78	8,42	8,64	11,58
		evo. %	25,43	-7,04	-1,10	19,00	14,15	6,35	-6,12
	Nb depl. Moy	2013	1,06	1,08	1,07	1,10	1,08	1,07	1,08
		2018	1,08	1,06	1,06	1,07	1,06	1,08	1,06
		evo. %	2,15	-1,76	-1,29	-2,75	-1,65	0,89	-1,62
	Part du motif	2013	9,78	8,90	9,02	9,30	8,80	9,10	9,65
		2018	9,60	9,00	9,16	9,12	8,86	9,26	9,58
		evo. %	-1,84	1,07	1,53	-1,94	0,74	1,73	-0,74

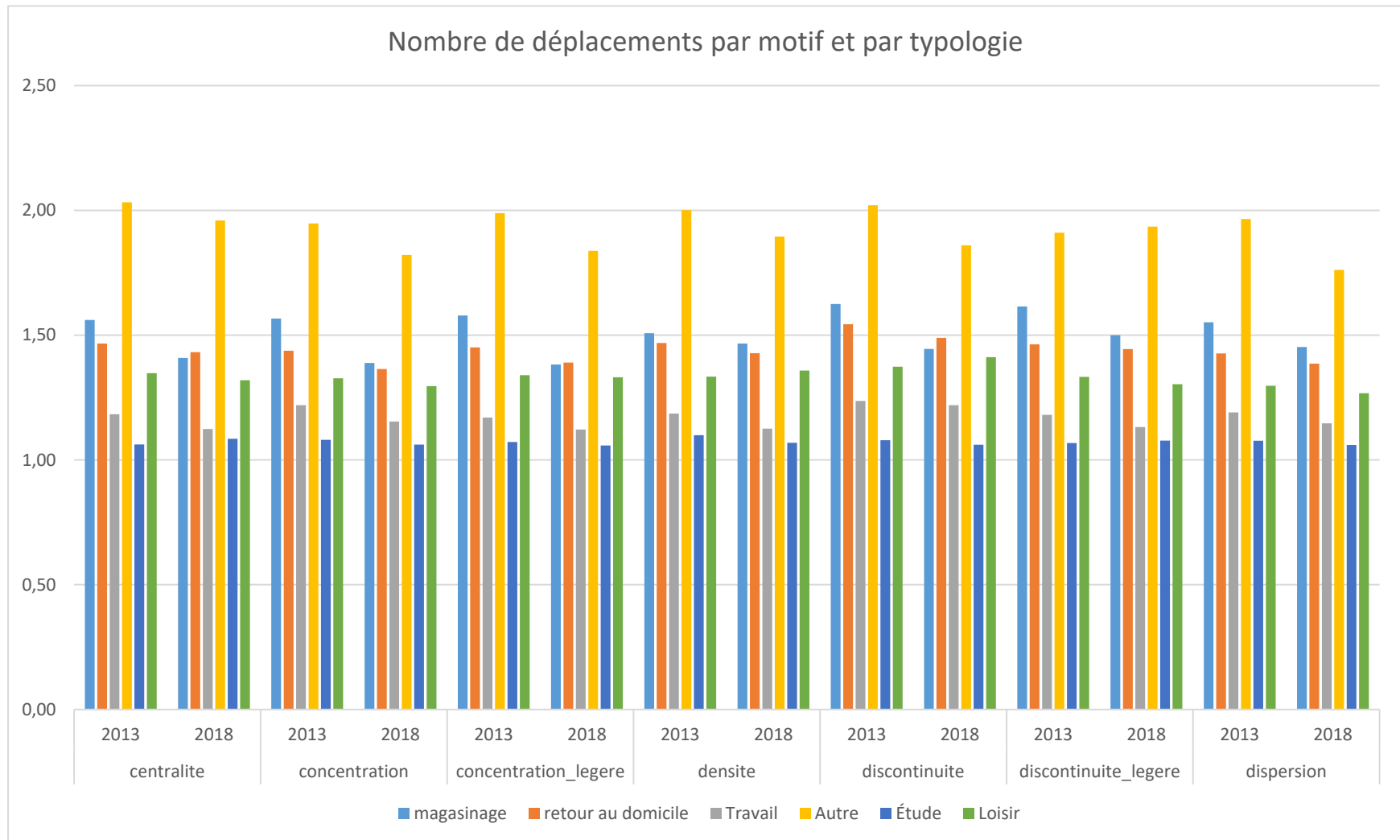
**ANNEXE W INDICATEURS DE MOBILITÉ – MOTIFS DE DÉPLACEMENT (LOISIR,
MAGASINAGE, AUTRE) PAR TYPOLOGIE**

motif	variable	année	Centralité	Concentration	Concentration légère	densité	discontinuité	discontinuité légère	dispersion
Loisir	distance moyenne	2013	9,99	19,06	13,00	9,01	8,50	10,24	15,96
		2018	10,75	17,71	14,03	10,74	10,80	11,56	16,30
		evo. %	7,65	-7,11	7,91	19,23	27,11	12,85	2,11
	Nb depl. Moy	2013	1,35	1,33	1,34	1,33	1,37	1,33	1,30
		2018	1,32	1,30	1,33	1,36	1,41	1,30	1,27
		evo. %	-2,10	-2,39	-0,60	1,83	2,77	-2,21	-2,29
	Part du motif	2013	7,80	7,93	8,09	8,18	9,43	8,16	7,61
		2018	7,90	8,16	7,89	8,41	9,85	8,25	7,26
		evo. %	1,30	2,85	-2,38	2,83	4,45	1,11	-4,63
Magasinage	distance moyenne	2013	4,93	10,71	7,59	4,81	4,57	5,44	8,27
		2018	5,64	10,80	7,92	5,82	5,92	5,99	9,31
		evo. %	14,55	0,90	4,34	20,99	29,56	10,08	12,54
	Nb depl. Moy	2013	1,56	1,57	1,58	1,51	1,62	1,62	1,55
		2018	1,41	1,39	1,38	1,47	1,44	1,50	1,45
		evo. %	-9,75	-11,37	-12,44	-2,72	-11,07	-7,15	-6,36
	Part du motif	2013	9,09	8,70	9,39	9,36	9,32	9,29	8,23
		2018	8,24	8,07	8,47	8,73	8,43	8,44	8,00
		evo. %	-9,38	-7,23	-9,85	-6,73	-9,60	-9,10	-2,76
Autre	distance moyenne	2013	7,20	14,04	9,38	6,46	6,46	7,36	11,10
		2018	7,60	12,83	10,04	7,28	8,30	8,12	11,70
		evo. %	5,54	-8,58	7,03	12,59	28,50	10,46	5,46
	Nb depl. Moy	2013	2,03	1,95	1,99	2,00	2,02	1,91	1,97
		2018	1,96	1,82	1,84	1,90	1,86	1,93	1,76
		evo. %	-3,58	-6,50	-7,60	-5,28	-7,95	1,28	-10,35
	Part du motif	2013	12,00	11,76	12,45	12,16	11,34	12,42	12,38
		2018	12,15	11,31	12,22	12,17	10,93	12,50	11,63
		evo. %	1,22	-3,84	-1,85	0,05	-3,64	0,64	-5,99

ANNEXE X PARTS MODALES PAR TYPOLOGIE



ANNEXE Y NOMBRE DE DÉPLACEMENTS PAR MOTIF ET PAR TYPOLOGIE



ANNEXE Z VKT CONSOMMÉS PAR PERSONNE ENTRE 2001 ET 2016

