

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE – URBANISATION CULTURE SOCIÉTÉ

**ANALYSE DU NIVEAU DE PERMÉABILITÉ FILTRÉE DANS PLUSIEURS
VILLES À TRAVERS LE MONDE**

Le principe bien-aimé mais inconnu des villes cyclables

Par

Maxime SAVARIA

Baccalauréat en ingénierie – génie civil

Mémoire présenté pour obtenir le grade de

Maître ès sciences, M.Sc.

Maîtrise en études urbaines

Programme offert conjointement par l'INRS et l'UQAM

Septembre 2021

© Maxime SAVARIA, 2021

Ce mémoire intitulé

**ANALYSE DU NIVEAU DE PERMÉABILITÉ FILTRÉE DANS PLUSIEURS
VILLES À TRAVERS LE MONDE**

Le principe bien-aimé mais inconnu des villes cyclables

et présenté par

Maxime SAVARIA

a été évalué par un jury composé de

M. Philippe APPARICIO, directeur de recherche, INRS

M. Mathieu CARRIER, codirecteur, INRS

Mme Sophie L. VAN NESTE, examinateur interne, INRS

Mme Geneviève BOISJOLY, examinatrice externe, Polytechnique Montréal

RÉSUMÉ

La mobilité a une influence marquée sur les enjeux de durabilité en raison de ses multiples impacts négatifs d'ordre environnementaux, sociaux et économiques. Ces impacts étant causés en grande partie par un important recours à l'automobile, plusieurs villes aspirent aujourd'hui à une réduction de son utilisation au profit du vélo. Pour favoriser ce transfert modal, il est inévitable de procéder à un « rééquilibrage » dans l'efficacité de ces modes de transport. Un intérêt grandissant devrait alors être porté vers le principe peu connu ayant fait le succès des grandes villes cyclables : la « perméabilité filtrée ». Dans ces villes, la liberté de mouvement d'un.e cycliste est considérablement plus grande que celle d'un.e automobiliste.

Le mémoire vise à répondre à deux objectifs principaux. Premièrement, nous discutons du concept de perméabilité filtrée puisqu'il s'agit d'une approche très peu mobilisée dans le domaine de la planification des transports. Deuxièmement, nous tentons de l'opérationnaliser, ce qui n'a pas été fait à ce jour, en proposant une première mesure de perméabilité filtrée. Plus spécifiquement, cette mesure a été utilisée pour étudier la variabilité du niveau de perméabilité filtrée dans plusieurs villes à travers le monde. La contribution visée du mémoire est donc à la fois théorique et méthodologique.

Un indice de perméabilité filtrée a été développé de façon à comparer la liberté de mouvement (perméabilité) qu'offrent le réseau accessible en vélo et celui en automobile. L'indice a été calculé à l'aide des données d'OpenStreetMap (OSM) dans soixante villes regroupées en cinq régions géographiques, soit l'Amérique du Nord (n=16), l'Amérique centrale et du Sud (n=8), l'Asie (n=10), l'Europe (n=21) et l'Océanie (n=5).

Les résultats démontrent qu'un.e cycliste d'une ville européenne a une liberté de mouvement qui est en moyenne 44% plus importante que celle d'un.e automobiliste. Ce niveau de perméabilité filtrée est environ trois fois supérieur à celui mesuré dans les quatre autres régions géographiques où les résultats s'avèrent être sensiblement les mêmes.

Mots-clés : perméabilité filtrée; vélo; planification des transports; mobilité urbaine durable; infrastructure cyclable

ABSTRACT

Mobility has a strong influence on sustainability issues due to its multiple negative environmental, social and economic impacts. These impacts being largely caused by an extensive use of motor vehicles, many cities are now seeking to reduce its use in favour of cycling. To promote this modal shift, major efforts must be made to “rebalance” the effectiveness of these modes. In order to do so, there should be a growing interest in the unknown principle that has made the best cycling cities successful: “filtered permeability”. In these cities, the freedom of movement of a cyclist is considerably greater than that of a motorist.

The thesis aims to address two main objectives. First, we discuss the concept of filtered permeability, since it is an approach that has been little used in the field of transport planning. Second, we attempt to operationalize it, which has not been done to date, by proposing a first measure of filtered permeability. More specifically, this measure has been used to study the variability of the filtered permeability level in several cities around the world. The contribution of this thesis is therefore both theoretical and methodological.

An index of filtered permeability was developed to compare the freedom of movement (permeability) offered by the network accessible by bicycle and that by car. The index was calculated using OpenStreetMap (OSM) data in sixty cities grouped into five geographic regions: North America (n=16), Central and South America (n=8), Asia (n=10), Europe (n=21) and Oceania (n=5).

The results show that the freedom of movement of a cyclist in a European city is on average 44% greater than a motorist’s. This level of filtered permeability is about three times higher than what was measured in the other four geographic regions, where the results were found to be about the same.

Keywords: filtered permeability; bike; transport planning; sustainable urban mobility; cycling infrastructure

AVANT-PROPOS

Quand j'ai débuté mes études en génie civil, je pensais naïvement qu'elles m'amèneraient à participer à la construction de ponts et d'imposants édifices. Pourtant, c'est rapidement la branche moins connue de la planification des transports qui m'a intéressé de par son côté plus humain et créatif. Ensuite, au travers de mon stage au Ministère des Transports du Québec, je suis tombé quasi par hasard sur le concept de perméabilité filtrée. Je me rappelle de m'être étonné de sa grande intuitivité et simplicité. Bien loin de la complexité qu'implique envoyer un paquet de circuit électrique sur mars. À la façon des grandes villes cyclables, pour favoriser un fort recours au vélo il faut planifier un réseau avantageant les cyclistes et non les automobilistes. Assez évident. Pourtant je n'en avais jamais entendu parler, et ce, comme il s'agit d'une approche inconnue en Amérique du Nord et loin de celle dominante.

Ce mémoire m'aura permis d'approfondir le concept de perméabilité filtrée tout comme de poser un regard plus général sur la mobilité urbaine et ses enjeux de durabilité. J'ai débuté ce mémoire, en tant que cycliste récréatif occasionnel, je le termine en tant que cycliste utilitaire convaincu. Je n'aurai donc pas construit d'immenses édifices, mais plutôt ajouté une brique à celui des connaissances sur la mobilité durable.

Ce mémoire a été rédigé en suivant les directives du guide de rédaction inclusive de l'INRS.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Mathieu Carrier sans qui aucun de ces mots n'auraient été écrits. Merci de m'avoir proposé de poursuivre des études enrichissantes à l'INRS, une possibilité qui m'était alors complètement inconnue. Merci également pour ton soutien rassurant et tes bons commentaires tout au long de l'écriture du mémoire et de l'article. J'ai maintenant bien hâte de débiter ma carrière au sein de la même équipe !

Je tiens également et bien sûr à remercier Philippe Apparicio. Merci d'avoir cru en moi à notre première rencontre, quand j'avais comme simple idée de recherche le nom d'un concept. Merci de m'avoir laissé du temps et de la liberté tout au long du processus tout en m'aguillant aussi bien lorsque nécessaire. Merci également d'avoir fait du LAEQ un environnement si stimulant et dynamique en regroupant une si bonne équipe. J'ai eu du fun en titi !

Un merci tout spécial à ma cousine et coloc Catherine. Merci pour notre belle cohabitation et ta présence qui a été fort agréable en cette dernière année pas comme les autres. Je remercie finalement mon bon ami Thomas de m'avoir aussi bien équipé pour le vélo, ce qui m'a permis de vivre concrètement les enjeux liés à ma recherche lors de mes déplacements en ville.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	iii
Abstract	iv
Avant-propos	v
Remerciements	vi
Table des matières	vii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xi
Liste des abréviations et des sigles	xv
Introduction	1
Chapitre 1 : Revue de littérature et problématique	3
1.1 Aménagement durable des villes	3
1.1.1 <i>Urbanisation rapide et environnement</i>	3
1.1.2 <i>Les villes comme acteurs clés du développement durable</i>	4
1.1.3 <i>Actions menées par les villes</i>	6
1.2 Mobilité	6
1.2.1 <i>Bénéfices et inconvénients</i>	7
1.2.2 <i>Historique et avènement de l'automobile</i>	8
1.2.3 <i>Approche traditionnelle en planification des transports</i>	10
1.2.4 <i>Enjeux liés à la mobilité</i>	11
1.2.5 <i>Planifier la mobilité de demain : un défi de taille pour les autorités</i>	16
1.2.6 <i>Changement de paradigme en planification des transports</i>	17
1.3 Mobilité durable	18
1.3.1 <i>Historique et définition</i>	18
1.3.2 <i>Différences avec l'approche traditionnelle</i>	19
1.3.3 <i>Champs d'actions</i>	21
1.4 Perméabilité filtrée	22
1.4.1 <i>Perméabilité et connectivité</i>	22

1.4.2	<i>Définition et critiques</i>	22
1.4.3	<i>Facteurs influençant le niveau de perméabilité filtrée</i>	24
1.4.4	<i>Lieux d'application</i>	34
1.4.5	<i>Impact sur la pratique du vélo</i>	35
1.5	Problématique	38
1.5.1	<i>Problème de recherche</i>	38
1.5.2	<i>Objectifs</i>	40
1.5.3	<i>Question et hypothèses</i>	40
Chapitre 2	Méthodologie	42
2.1	Sélection des villes à l'étude	42
2.2	Critères à considérer lors de l'opérationnalisation d'un concept	43
2.3	Recension des dimensions et indicateurs	45
2.3.1	<i>Configuration – présentation des indicateurs</i>	47
2.3.2	<i>Connectivité – présentation des indicateurs</i>	49
2.3.3	<i>Densité – présentation des indicateurs</i>	52
2.4	Indice de perméabilité filtrée	53
2.4.1	<i>Approche générale</i>	53
2.4.2	<i>Choix de l'unité</i>	54
2.4.3	<i>Indicateurs retenus</i>	54
2.4.4	<i>Formule</i>	60
2.5	Calcul de l'indice de perméabilité filtrée au niveau d'une ville	61
2.6	Gestion des valeurs aberrantes	62
2.7	Données et outils utilisés	63
Chapitre 3	Résultats	66
3.1	Introduction	69
3.2	Literature review	70
3.2.1	<i>Filtered permeability: definition and criticism</i>	70
3.2.2	<i>Factors influencing a network's filtered permeability level</i>	71

3.2.3	<i>Application places of filtered permeability</i>	72
3.2.4	<i>Filtered permeability and its impact on cycling</i>	73
3.3	Research objectives	73
3.4	Methodology	74
3.4.1	<i>Selected Cities</i>	74
3.4.2	<i>Filtered permeability index</i>	75
3.4.3	<i>Calculation of the permeability index at the intra-urban level</i>	79
3.4.4	<i>Data and tools used to calculate the index</i>	79
3.5	Results	80
3.5.1	<i>Ranking of cities according to the filtered permeability index and regional analyses</i> ..	80
3.5.2	<i>Breakdown of intra-urban filtered permeability indicators and analyses</i>	82
3.6	Discussion	87
3.6.1	<i>Limits of the study</i>	87
3.6.2	<i>Potential influence of filtered permeability on mobility behaviours</i>	87
3.6.3	<i>Filtered permeability as a transport planning approach</i>	88
3.6.4	<i>Filtered permeability index: a support tool for decision-making</i>	89
3.7	Conclusion	90
Chapitre 4	Discussion	92
4.1	Rappel et interprétation des principaux résultats	92
4.1.1	<i>Rappel des résultats</i>	92
4.1.2	<i>Interprétation des résultats</i>	93
4.2	Influence de l'environnement urbain sur le choix modal	94
4.2.1	<i>L'accessibilité comme concept clé</i>	94
4.2.2	<i>Caractéristiques influençant le niveau d'accessibilité</i>	96
4.2.3	<i>Formes urbaines durables</i>	97
4.2.4	<i>Retour sur les résultats</i>	99
4.2.5	<i>Changement dans la perméabilité des réseaux</i>	100

4.3 La perméabilité filtrée comme approche innovante en planification des transports	102
4.3.1 Adapter la stratégie en fonction de l'environnement urbain.....	102
4.3.2 L'indice de perméabilité filtrée : un outil d'aide à la décision	104
4.3.3 Principaux intérêts de l'approche de perméabilité filtrée	106
4.4 Limites de l'étude et pistes de recherches futures.....	107
4.4.1 Limites des données et de la méthode	107
4.4.2 Pistes de recherche futures.....	109
Conclusion.....	110
Bibliographie	112
Annexe 1 : Résultats désagrégés par dimension et méthode de tukey	135
Annexe 2 : Cartes des villes	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Approches contrastantes en planification des transports	20
Tableau 2. Mesures de perméabilité filtrée	25
Tableau 3. Mesures d'apaisement de la circulation	31
Tableau 4. Principaux types d'infrastructures cyclables et leurs impacts sur la perméabilité filtrée	34
Tableau 5. Villes sélectionnées par région géographique et selon les quatre critères de sélection (population entre parenthèses).....	43
Tableau 6. Classification des indicateurs de perméabilité selon la dimension mesurée.....	46
Tableau 7. Exemples d'ajustements nécessaires pour calculer le l'indicateur du <i>metric reach</i> pour le réseau accessible au vélo	59
Tableau 8. Filtered permeability measures	71
Tableau 9. Main types of cycling infrastructures and their impacts on filtered permeability	72
Tableau 10. Cities selected per geographic region and according to the four selection criteria (population in brackets)	75
Tableau 11. Classification of permeability indicators	76
Tableau 12. Cities listed according to their average filtered permeability index weighted by the ambient population	81
Tableau 13. Exemples d'approche à privilégier selon le type d'environnement urbain.....	103
Tableau 14. Villes listées en fonction de l'indice de perméabilité filtrée moyen pondéré par la population ambiante et désagrégé par dimensions.....	135
Tableau 15. Comparaisons multiples des moyennes par la méthode de Tukey (niveau de confiance de 95%).....	136

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle du transport urbain et du défi de sa durabilité	8
Figure 2. Exemple de route additionnelle comme mesure de perméabilité filtrée (infrastructure cyclable le long du canal Lachine à Montréal)	26
Figure 3. Exemple d'un obstacle physique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Malmö en Suède).....	27

Figure 4. Exemple de signalisation comme mesure de perméabilité filtrée (Ville de Montréal) ..	28
Figure 5. Exemple de voie à sens unique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Walthamstow à Londres) ; les lignes rouges indiquent les frontières de la zone et les lignes bleues le sens de circulation automobile des rues.....	29
Figure 6. Exemple de sens unique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Montréal) ...	29
Figure 7. Exemple de croisement dénivelé comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Houten aux Pays-Bas).....	32
Figure 8. Principaux types d'infrastructures cyclables.....	33
Figure 9. Exemple de réseau qualifié de <i>fused grid</i>	37
Figure 10. Schéma de la revue de littérature	39
Figure 11. Exemple schéma de création d'un indice	44
Figure 12. Exemple d'une isochrone de 5000 mètres.....	55
Figure 13. Exemple de points générés pour le calcul du PRD	56
Figure 14. Exemple de <i>metric reach</i>	57
Figure 15. Exemple de cellules à partir desquelles l'indice de perméabilité filtrée est calculé	62
Figure 16. Exemple d'isochrone mal tracée	63
Figure 17. Permeability level of cities according to their geographic region	82
Figure 18 a, b. Intra-urban filtered permeability level and network analysis in (a) Helsinki and (b) Houten	84
Figure 19. Intra-urban filtered permeability level and network analysis of the city of Phoenix	86
Figure 20 : Cycle de rétroaction transport-utilisation du sol	95
Figure 21. Réseau routier du centre-ville de Montréal (à gauche) et de l'arrondissement de Pierrefonds-Roxboro (à droite)	101
Figure 22. Perméabilité filtrée, Helsinki (n = 494 ; moyenne = 1,01 ; rang = 1/60).....	138
Figure 23. Perméabilité filtrée, Oslo (n = 764 ; moyenne = 0,71 ; rang = 2/60)	139
Figure 24. Perméabilité filtrée, Fribourg (n = 206 ; moyenne = 0,59 ; rang = 3/60)	140
Figure 25. Perméabilité filtrée, Brême (n = 507 ; moyenne = 0,51 ; rang = 4/60)	141
Figure 26. Perméabilité filtrée, Houten (n = 101 ; moyenne = 0,51 ; rang = 5/60)	142
Figure 27. Perméabilité filtrée, Anvers (n = 326 ; moyenne = 0,50 ; rang = 6/60)	143
Figure 28. Perméabilité filtrée, Malmö (n = 180 ; moyenne = 0,48 ; rang = 7/60).....	144
Figure 29. Perméabilité filtrée, Groningue (n = 156 ; moyenne = 0,45 ; rang = 8/60).....	145
Figure 30. Perméabilité filtrée, Münster (n = 530 ; moyenne = 0,43 ; rang = 9/60).....	146
Figure 31. Perméabilité filtrée, Utrecht (n = 177 ; moyenne = 0,42 ; rang = 10/60)	147
Figure 32. Perméabilité filtrée, Ljubljana (n = 394 ; moyenne = 0,39 ; rang = 11/60)	148

Figure 33. Perméabilité filtrée, Strasbourg (n = 127 ; moyenne = 0,37 ; rang = 12/60)	149
Figure 34. Perméabilité filtrée, Amsterdam (n = 364 ; moyenne = 0,36 ; rang = 13/60)	150
Figure 35. Perméabilité filtrée, Vienne (n = 620 ; moyenne = 0,36 ; rang = 14/60)	151
Figure 36. Perméabilité filtrée, Copenhague (n = 179 ; moyenne = 0,34 ; rang = 15/60)	152
Figure 37. Perméabilité filtrée, Maastricht (n = 108 ; moyenne = 0,33 ; rang = 16/60)	153
Figure 38. Perméabilité filtrée, Berlin (n = 1541 ; moyenne = 0,32 ; rang = 17/60)	154
Figure 39. Perméabilité filtrée, Bogota (n = 449 ; moyenne = 0,31 ; rang = 18/60)	155
Figure 40. Perméabilité filtrée, Calgary (n = 1383 ; moyenne = 0,31 ; rang = 19/60)	156
Figure 41. Perméabilité filtrée, Hambourg (n = 1287 ; moyenne = 0,29 ; rang = 20/60).....	157
Figure 42. Perméabilité filtrée, Bordeaux (n = 79 ; moyenne = 0,28 ; rang = 21/60)	158
Figure 43. Perméabilité filtrée, Barcelone (n = 150 ; moyenne = 0,27 ; rang = 22/60).....	159
Figure 44. Perméabilité filtrée, Paris (n = 185 ; moyenne = 0,26 ; rang = 23/60)	160
Figure 45. Perméabilité filtrée, Taipei (n = 317 ; moyenne = 0,26 ; rang = 24/60).....	161
Figure 46. Perméabilité filtrée, Ottawa (n = 3607 ; moyenne = 0,25 ; rang = 25/60)	162
Figure 47. Perméabilité filtrée, Melbourne (n = 9229 ; moyenne = 0,23 ; rang = 26/60).....	163
Figure 48. Perméabilité filtrée, Rio de Janeiro (n = 1264 ; moyenne = 0,21 ; rang = 27/60).....	164
Figure 49. Perméabilité filtrée, Edmonton (n = 1339 ; moyenne = 0,21 ; rang = 28/60)	165
Figure 50. Perméabilité filtrée, Brisbane (n = 1235 ; moyenne = 0,20 ; rang = 29/60).....	166
Figure 51. Perméabilité filtrée, Mexico (n = 1386 ; moyenne = 0,19 ; rang = 30/60)	167
Figure 52. Perméabilité filtrée, Séoul (n = 810 ; moyenne = 0,17 ; rang = 31/60)	168
Figure 53. Perméabilité filtrée, Tokyo (n = 2126 ; moyenne = 0,17 ; rang = 32/60).....	169
Figure 54. Perméabilité filtrée, Santiago (n = 1693 ; moyenne = 0,16 ; rang = 33/60).....	170
Figure 55. Perméabilité filtrée, Buenos Aires (n = 286 ; moyenne = 0,16 ; rang = 34/60)	171
Figure 56. Perméabilité filtrée, Hong Kong (n = 866 ; moyenne = 0,16 ; rang = 35/60).....	172
Figure 57. Perméabilité filtrée, Christchurch (n = 1385 ; moyenne = 0,15 ; rang = 36/60).....	173
Figure 58. Perméabilité filtrée, Québec (n = 648 ; moyenne = 0,15 ; rang = 37/60)	174
Figure 59. Perméabilité filtrée, San Francisco (n = 198 ; moyenne = 0,14 ; rang = 38/60).....	175
Figure 60. Perméabilité filtrée, Montréal (n = 876 ; moyenne = 0,14 ; rang = 39/60).....	176
Figure 61. Perméabilité filtrée, Pékin (n = 12 529 ; moyenne = 0,14 ; rang = 40/60).....	177
Figure 62. Perméabilité filtrée, Kyoto (n = 5337, moyenne = 0,14, rang = 41/60)	178
Figure 63. Perméabilité filtrée, Portland (n = 579 ; moyenne = 0,14 ; rang = 42/60)	179
Figure 64. Perméabilité filtrée, Toronto (n = 1035 ; moyenne = 0,13 ; rang = 43/60)	180
Figure 65. Perméabilité filtrée, Shanghai (n = 7642 ; moyenne = 0,13 ; rang = 44/60).....	181
Figure 66. Perméabilité filtrée, Jérusalem (n = 156 ; moyenne = 0,13 ; rang = 45/60)	182

Figure 67. Perméabilité filtrée, Denver (n = 504 ; moyenne = 0,12 ; rang = 46/60)	183
Figure 68. Perméabilité filtrée, Lima (n = 1786 ; moyenne = 0,12 ; rang = 47/60).....	184
Figure 69. Perméabilité filtrée, Sydney (n = 4668 ; moyenne = 0,12 ; rang = 48/60).....	185
Figure 70. Perméabilité filtrée, Boston (n = 211 ; moyenne = 0,11 ; rang = 49/60)	186
Figure 71. Perméabilité filtrée, São Paulo (n = 1673 ; moyenne = 0,11 ; rang = 50/60)	187
Figure 72. Perméabilité filtrée, Seattle (n = 426 ; moyenne = 0,11 ; rang = 51/60)	188
Figure 73. Perméabilité filtrée, Sacramento (n = 377 ; moyenne = 0,11 ; rang = 52/60)	189
Figure 74. Perméabilité filtrée, Auckland (n = 4644 ; moyenne = 0,11 ; rang = 53/60).....	190
Figure 75. Perméabilité filtrée, Vancouver (n = 212 ; moyenne = 0,10 ; rang = 54/60).....	191
Figure 76. Perméabilité filtrée, Los Angeles (n = 1629 ; moyenne = 0,10 ; rang = 55/60)	192
Figure 77. Perméabilité filtrée, Phoenix (n = 1569 ; moyenne = 0,08 ; rang = 56/60).....	193
Figure 78. Perméabilité filtrée, Erevan (n = 351 ; moyenne = 0,07 ; rang = 57/60)	194
Figure 79. Perméabilité filtrée, Quito (n = 2159 ; moyenne = 0,07 ; rang = 58/60).....	195
Figure 80. Perméabilité filtrée, Manille (n = 50 ; moyenne = 0,06 ; rang = 59/60)	196
Figure 81. Perméabilité filtrée, La Havane (n = 831 ; moyenne = 0,02 ; rang = 60/60)	197

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

AIE	Agence International de l'Énergie
CMM	Communauté Métropolitaine de Montréal
FP	Filtered permeability
OMS	Organisation mondiale de la Santé
OSM	OpenStreetMap
ONU	Organisation des Nations Unis
PRD	Pedestrian route directness

INTRODUCTION

Les comportements de mobilité de la population mondiale ont un grand impact sur la durabilité des villes. D'un avis généralisé, les niveaux actuels d'utilisation de l'automobile, de consommation de carburant et d'émissions de gaz à effet de serre ne sont pas durables (Williams 2017). D'une part, le nombre de véhicules enregistrés dans le monde a été multiplié par sept entre 1960 et 2010, passant de 100 à 700 millions (Rode et al. 2017). D'autre part, selon les estimations de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), le secteur du transport a consommé 31,6% de l'énergie mondiale en 2016 (AIE 2018). Cette énergie provenant en grande partie de ressources non renouvelables, le transport routier est responsable de 18% des émissions mondiales de CO₂ (AIE 2019). De plus, tel que le soulignait un article du journal La Presse publié le 15 avril 2020 :

Les émissions canadiennes de gaz à effet de serre [en 2018] provenant des véhicules automobiles, de la fabrication et de la production de combustibles fossiles ont pratiquement balayé tous les progrès réalisés par le Canada dans la réduction de ses émissions de GES depuis 2005. (La Presse canadienne 2020).

Finalement, citons également les impacts sociaux et économiques liés aux hauts niveaux de pollution, d'accidents et de congestion causés par le transport motorisé (Gössling 2016 ; Stanley, Hensher et Loader 2011).

Dans ce contexte, les initiatives visant à tendre vers une mobilité urbaine plus durable se sont multipliées dans les dernières années (Holden, Gilpin et Banister 2019). Parmi ces initiatives, plusieurs politiques de transports ont pour objectif de stimuler au sein des villes une forte utilisation du vélo au détriment de celle de l'automobile (Babalik-Sutcliffe 2013). En effet, il est désormais largement admis que les modes actifs ont un rôle important à jouer dans la mobilité durable (J. R. Pucher et Buehler 2012), tandis que les transports motorisés sont souvent considérés comme une cause importante des problèmes de durabilité (Banister 2005). Pour favoriser ce transfert modal, de grands efforts doivent être déployés pour procéder à un « rééquilibrage » dans l'efficacité de ces modes de transport, et ce, en aménageant les villes de façon à encourager l'utilisation du vélo et de la marche tout en dissuadant celle de l'automobile (Banister 2008 ; Aldred et Croft 2019). Par contre, il s'agit d'un objectif complexe à atteindre pour les nombreuses villes s'étant développées de façon à accommoder en premier lieu l'automobile. Ce faisant, leurs morphologies favorisent aujourd'hui grandement le recours à l'automobile, ce qui est difficile à altérer. Malgré tout, certaines villes, majoritairement européennes, y sont parvenues en planifiant

des réseaux de transport caractérisés par un haut niveau de « perméabilité filtrée » (Melia 2015). Selon ce principe de planification des transports, la liberté de mouvement d'une personne doit être plus grande si elle se déplace en transport actif comparativement à en automobile (Melia 2008). Pour ce faire, le réseau accessible aux piétons et cyclistes doit être plus dense, étendu et connecté, ce qui a pour effet de leur offrir des trajets plus directs, et en ce sens de « filtrer » l'automobile. De cette façon, la mobilité active est favorisée puisqu'elle sera plus souvent envisagée comme la meilleure option pour se rendre aux destinations désirées.

Dans le cadre de ce mémoire, un objectif visé est d'exposer le concept de perméabilité filtrée comme très peu d'études s'y sont intéressées. De plus, aucune d'entre elles n'ayant pour l'instant proposé de l'opérationnaliser, un premier indice de perméabilité filtrée a été développé. En effet, les rares études sur le sujet se basent sur des observations et non des analyses quantitatives (Melia 2012). Cet indice a ensuite été utilisé dans 60 villes pour analyser la variabilité du niveau de perméabilité filtrée à travers le monde. La recherche suggère que tout comme pour d'autres facteurs connus (sécurité, accessibilité, mesures d'apaisement de la circulation, etc.), la perméabilité filtrée peut être une approche efficace pour créer un environnement urbain propice à l'utilisation du vélo au détriment de l'automobile. À notre connaissance, il s'agit de la première étude d'envergure réalisée sur le thème de la perméabilité filtrée.

Il s'agit d'un mémoire par article. Un article scientifique remplace donc le chapitre portant habituellement sur la présentation des résultats. Cet article s'intitule *Assessing filtered permeability around the globe: the unknown beloved principle of cycling cities* et a été soumis à la revue *Transportation Research Part D : Transport and Environment*. Le présent mémoire s'articule en quatre chapitres. Le premier est consacré à une revue de la littérature et traite de la problématique. Le second chapitre expose la méthodologie mobilisée pour répondre aux objectifs de recherche. Le troisième chapitre présente l'article qui rapporte de manière condensée l'ensemble de la démarche effectuée. Finalement, le quatrième chapitre comprend une discussion des résultats.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE ET PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre a pour objectif de résumer les connaissances portant sur les éléments clés liés au concept de perméabilité filtrée et de présenter la problématique de recherche. Pour ce faire, le chapitre est divisé en cinq grandes sections. Les quatre premières sections prennent la forme d'une recension des écrits. La première section porte sur l'aménagement durable des villes, plus particulièrement sur les enjeux liés à l'urbanisation. La seconde section traite de la mobilité en zone urbaine, plus précisément de son évolution, de ses enjeux et de sa planification. La troisième section présente le concept de mobilité durable. La quatrième section expose le concept de perméabilité filtrée comme outil de planification urbaine prometteur pour réduire l'utilisation de l'automobile et stimuler la pratique du vélo. Finalement, la dernière section de ce premier chapitre sert à formuler la problématique et à énoncer les objectifs, questions et hypothèses de recherche de ce mémoire.

1.1 Aménagement durable des villes

1.1.1 Urbanisation rapide et environnement

L'année 2007 marque un moment important dans l'histoire de l'humanité puisque, pour la première fois, la population mondiale habitait à plus de 50% en zone urbaine (Ahern 2011 ; J. Wu 2010). Selon l'Organisation des Nations Unies (ONU), cette tendance à l'urbanisation est à la hausse puisqu'ils estiment qu'en 2050 près de 70% de la population mondiale habitera en ville (ONU 2015). En effet, dans les prochaines décennies, il est prévu que 95% de la croissance de la population mondiale aura lieu dans les villes (Habitat 2013b ; Programme 2010). Elles accueilleront 2,5 milliards d'habitants supplémentaires pour porter la population urbaine totale à environ 6,5 milliards (ONU 2015). De plus, selon Seto, Güneralp et Hutya (2012), cette augmentation s'accompagnera d'une croissance de 1,2 million de km² des territoires urbanisés dès 2030, ce qui représente près du triple de cette superficie en 2000. Ceci implique que tous les jours, environ 180 000 personnes rejoignent les zones urbaines et que tous les ans est construit l'équivalent de deux fois la ville de Tokyo (James 2014).

Cette dynamique est en grande partie causée par l'adoption de l'urbanisation comme stratégie pour favoriser le développement économique dans les pays développés (Shen et al. 2011). Ainsi,

nombreux sont les citoyen.ne.s de ces pays qui s'établissent en ville afin d'y obtenir une meilleure qualité de vie. En effet, grâce à la grande densité de population que les zones urbaines peuvent supporter, elles offrent un coût plus faible par habitant.e pour la distribution d'eau, d'électricité, pour la gestion des déchets, l'assainissement et les télécommunications, tout en offrant une meilleure accessibilité à l'éducation, à l'emploi, aux soins de santé et aux services sociaux (J. J. Wu 2008). Les villes sont de cette façon devenues aujourd'hui le centre des transformations socioculturelles, les moteurs de la croissance économique et le berceau de l'innovation et du savoir (J. Wu 2010 ; Shearmur 2012).

Malgré tout, l'urbanisation rapide a aussi ses répercussions négatives. Tout d'abord, bien que les territoires urbanisés couvrent seulement 2% de la surface de la Terre, ils sont responsables d'environ 78% des émissions de gaz à effet de serre (Brown 2001 ; Grimm et al. 2008). Par exemple, selon Finco et Nijkamp (2001), une ville européenne moyenne d'un million d'habitant.e.s consomme tous les jours environ 320 000 tonnes d'eau, 11 500 tonnes de pétrole et 2000 tonnes de nourriture. Pour ces raisons, l'empreinte écologique d'une ville, soit la surface terrestre nécessaire pour produire les biens et services consommés par sa population tout en absorbant les déchets, varie entre 10 et 100 fois la taille d'une ville (Rees et Wackernagel 2008 ; Luck et al. 2001). L'urbanisation a aussi un impact sur le climat local en créant des îlots de chaleur (Buyantuyev et Wu 2010) et représente l'une des formes les plus sévères de transformation de l'utilisation du sol, pouvant mener à la dégradation des écosystèmes (Savard, Clergeau et Mennechez 2000). Les villes sont également fortement génératrices de pollutions sonores, de l'air et de l'eau (Grimm et al. 2008 ; J. Wu 2010), ces pollutions étant à l'origine d'iniquités sociales et environnementales (Burton 2000). Par conséquent, si l'urbanisation mondiale continue au rythme prédit, ces répercussions négatives vont inévitablement s'accélérer et s'aggraver.

1.1.2 Les villes comme acteurs clés du développement durable

La ville est devenue l'unité d'analyse privilégiée pour la recherche sur les questions de durabilité puisqu'elles affectent grandement le niveau de pression environnementale qu'une population exerce sur les écosystèmes et leurs ressources (Alberti 1996 ; Gallopín 2006). Pour Finco et Nijkamp (2001), trois grandes raisons justifient la mise en place de politiques environnementales au niveau des villes. Premièrement, la majorité de la production d'un pays, de la consommation et des activités de transport ont lieu dans les villes ou les régions urbaines. En effet, environ 75% de l'activité économique mondiale est réalisée en zone urbaine (ONU 2015).

Deuxièmement, en raison sa forme de gouvernance, la ville est une unité décisionnelle efficace – comme elle couvre un territoire précis – et court ainsi moins le risque de mettre en place des politiques trop hétérogènes les rendant inefficaces. De plus, elle favorise davantage la mobilisation citoyenne que les paliers de gouvernement plus élevés. Troisièmement, la ville est une unité statistique intéressante puisqu’habituellement une grande quantité de jeux de données y est systématiquement générée, ce qui facilite le suivi des politiques. D’autre part, dans son livre intitulé *If mayors ruled the world : Dysfunctional nations, rising cities*, Barber (2013) indique que les villes ne sont pas impliquées dans les enjeux de frontières et de souveraineté, ce qui est à leur avantage puisqu’il s’agit d’enjeux qui limitent parfois la capacité des pays à travailler ensemble. En effet, lorsqu’il est question de changements climatiques, il serait trois fois plus probable que les villes passent des paroles aux actes si une cible a été établie, puisqu’elles ont un pouvoir important sur les politiques et les secteurs qui contribuent le plus à l’émission de gaz à effet de serre (Cities 2017). Néanmoins, il importe de nuancer quelque peu ce discours puisque l’importance des pouvoirs et compétences des villes peut varier considérablement d’un pays à l’autre. La capacité d’agir des villes n’est pas toujours la même et elles ne sont donc pas toujours en position aussi avantageuse.

Ceci explique pourquoi plusieurs organismes internationaux, comme l’ONU, la Banque Mondiale, l’Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et la Commission européenne (CE) se sont engagés dans les dernières années à promouvoir une urbanisation durable (Shen et al. 2011). Cette nouvelle reconnaissance de l’importance des villes a culminé dans le Nouvel agenda urbain (III 2016) et plus spécifiquement dans le premier *Urban sustainable development agenda* (USDG) faisant partie du Programme de développement durable à l’horizon 2030 adopté en septembre 2015 par l’ONU. Parmi les 17 objectifs de développement durable (ODD) du programme, l’un d’eux est de faire en sorte que les villes soient des endroits inclusifs, sécuritaires, résilients et durables. Dans cet objectif, un intérêt particulier est porté sur la planification urbaine (Klopp et Petretta 2017). Cela représente une nouvelle approche comparativement au dernier programme puisque les villes y sont identifiées pour la première fois comme des acteurs clés du développement durable (Parnell 2016).

Il faut ainsi reconnaître que les villes sont au cœur des enjeux contemporains, mais qu’elles sont dans une position unique pour développer de bonnes stratégies de durabilité (Finco et Nijkamp 2001). En raison de son caractère multidimensionnel, l’enjeu de la durabilité urbaine est abordé dans plusieurs disciplines, ce qui explique qu’un nombre impressionnant de travaux visant à joindre la durabilité et le développement urbain a été publié dans les dernières années dans le

domaine des études urbaines (Turcu 2013). En résumé, si le développement des villes est une des plus grandes réussites, alors développer des villes durables est un des plus grands défis du monde moderne (J. Wu 2010).

1.1.3 Actions menées par les villes

L'exemple le plus marquant de la préoccupation des villes face aux enjeux de durabilité est sans doute la création en 2005 du *C40 Cities Climate Leadership Group* (C40). Cette organisation rassemble les mairesses et maires et leurs équipes de 96 des plus grandes villes du monde, représentant plus de 700 millions de personnes et 25% de l'économie mondiale. Elle a pour objectif d'aider les villes à poser les actions nécessaires et essentielles pour contrer les changements climatiques et ainsi offrir un futur prospère, sain et durable à la population urbaine à travers le monde (Cities 2017). Pour ce faire, des actions sont déployées dans cinq domaines, soit l'adaptation aux changements climatiques, la qualité de l'air, l'énergie et les bâtiments, la gestion des déchets et de la nourriture ainsi que le transport et la planification urbaine. Ces catégories sont reconnues pour présenter le plus grand potentiel de bénéfices climatiques à travers les villes, et représentent ainsi les meilleures initiatives à mettre en place pour tendre vers une plus grande durabilité urbaine (Cities 2017). Dans le cadre des prochaines sections, nous nous intéresserons à ce dernier domaine, soit celui du transport et de la planification urbaine.

1.2 Mobilité

La mobilité réfère à l'aspect physique du déplacement, soit à la capacité de se déplacer pour se rendre d'un point à un autre ou au potentiel de mouvement (Hansen 1959). Elle englobe la liberté et la facilité de connecter les personnes, biens, services et opportunités sur un territoire (Lyons 2018 ; ECMT 2000). De son côté, le transport réfère davantage à l'action précise de se déplacer et est ainsi plus restrictif puisqu'il implique nécessairement la réalisation d'un déplacement, tandis que la mobilité ne fait qu'en représenter la possibilité (Sioui 2014). Malgré tout, les deux termes sont très semblables et ils seront considérés comme équivalents dans le cadre de ce mémoire. En somme, ils représentent l'objectif de surmonter la séparation spatiale qui résulte d'une variété de contraintes humaines et physiques, comme la distance, le temps, les décisions administratives et la topographie (Rodrigue 2016).

1.2.1 Bénéfices et inconvénients

Le transport est une activité essentielle aidant à combler les besoins humains, que ce soit pour se loger, manger, travailler, communiquer, se divertir, etc. Il soutient donc la qualité de vie de tout un chacun et est fondamental au bien-être et à l'estime de soi, mais aussi à l'atteinte des objectifs personnels (Sonnentag 2001 ; Reitzes, Mutran et Verrill 1995 ; Moons, Budts et De Geest 2006). Il permet de créer des liens et des relations entre des personnes de différentes localisations et est un facteur important de croissance et de stimulation économiques (Rodrigue 2016). Les sociétés gagnent de cette façon d'énormes bénéfices étant donné que l'économie est maintenant mondialisée et que les nouvelles infrastructures de transport permettent des déplacements rapides et à faible coût (Banister 2011). Ceci fait du transport l'une des activités humaines les plus importantes mondialement, les sociétés modernes étant caractérisées par une forte mobilité (Golinska et Hajdul 2012). Toutefois, en raison d'un fort recours à l'automobile et aux combustibles fossiles pour répondre à cette « hypermobilité » – terme proposé de Adams (1999) –, de nombreux impacts négatifs désormais largement reconnus et dénoncés sont générés (Meunier et Zéroual 2006). Les enjeux liés au transport sont donc multiples et contradictoires : la mobilité offre plusieurs bénéfices socioéconomiques, mais en même temps, ces bénéfices provoquent des impacts négatifs sur plusieurs plans (Rodrigue 2016). Ces enjeux sont désormais incontournables dans de nombreux domaines de l'action publique (Meunier et Zéroual 2006). La figure 1 présente cette dynamique.

Ainsi, les systèmes de transport supportent le mouvement des personnes et des biens, ce qui permet à la population de répondre à leurs besoins. Ceci stimule et favorise l'activité et la croissance économique sur le territoire. Le développement économique qui en résulte provoque une hausse de la demande de mobilité. Pour répondre à cette demande, l'évolution des systèmes de transport au fil du temps induit des changements dans les comportements de mobilité de la population en modifiant l'offre de transport (Hymel, Small et Van Dender 2010). Il y a alors une augmentation du nombre de déplacements, du taux de motorisation et de l'étalement urbain. Ces changements dans les comportements de mobilité produisent des impacts négatifs qui réduisent l'efficacité des systèmes de transports et donc la capacité de la population de se déplacer.

Ces impacts négatifs sont multiples, soit d'ordre environnemental, social et économique comme nous le verrons dans la section intitulée *Les enjeux liés à la mobilité* (1.2.3). Avant tout, la section suivante vise à dresser un bref portrait de l'évolution de la mobilité en zone urbaine dans le but de mieux comprendre les origines du cycle venant d'être présenté.

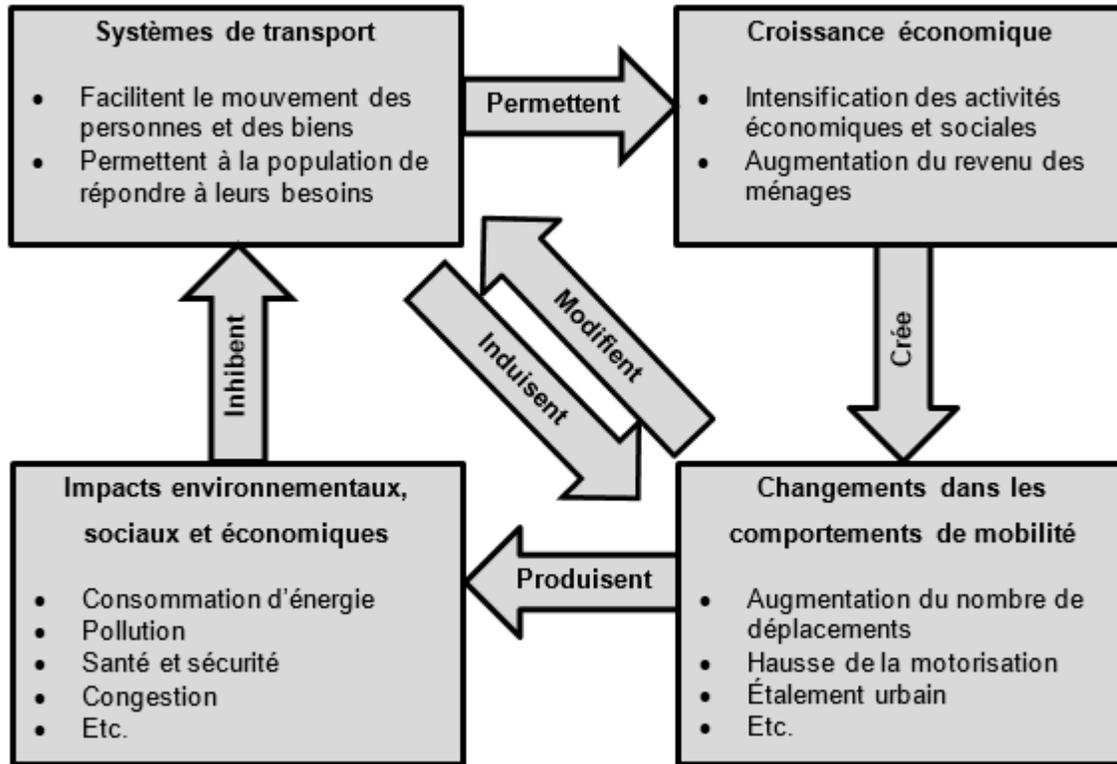


Figure 1. Cycle du transport urbain et du défi de sa durabilité

Source : traduit et adapté de Zegras (2005, figure I-1).

1.2.2 Historique et avènement de l'automobile

En 1900, les distances parcourues par personne étaient en moyenne d'un kilomètre par jour, ont augmenté à 10 kilomètres en 1960, et finalement à 50 kilomètres au tournant des années 2000 (Grübler 2004 ; cité par Banister 2012). Cette augmentation s'est surtout accélérée à la suite de la Seconde Guerre mondiale, soit dans la deuxième moitié du 20^e siècle, lorsque les échanges se sont libéralisés et mondialisés et que l'accès à l'automobile s'est démocratisé (Rodrigue 2016). En effet, Schäfer et al. (2009) a démontré qu'entre 1950 et 2005, le nombre de kilomètres parcourus par année par personne est passé de 4 530 kilomètres (12,4 km/jour) à 18 400 kilomètres (50,4 km/jour) dans les pays développés, soit une augmentation de plus de 400%. Selon différentes projections, ce nombre pourrait atteindre entre 29 500 et 42 200 kilomètres en 2050. Par contre, malgré tous les changements des dernières décennies dans les comportements de mobilité, un élément n'a pas changé : les temps de déplacements quotidiens. En effet, des recherches indiquent qu'ils sont restés stables, soit entre 1h et 1h20 par jour (Crozet et Joly 2004). Ainsi, l'arrivée de modes de transport plus rapides, surtout l'automobile, a permis de parcourir de

plus longues distances et d'effectuer plus de déplacements, ce qui a profondément transformé le développement des zones urbaines.

L'automobile a été introduite en Europe et en Amérique du Nord dans les années 1890, mais seules les personnes fortunées pouvaient s'en procurer une à l'époque (Rodrigue 2016). Par contre, dès 1920 le taux de motorisation a débuté son ascension grâce au prix d'achat plus faible de l'automobile rendu possible par les chaînes de montage de Henry Ford (Tremblay 2012). La démocratisation de l'automobile a alors provoqué de multiples changements dans la façon dont les zones urbaines se sont développées. Ces changements sont bien identifiés dans le livre de Rodrigue (2016) intitulé *The geography of Transport Systems*. Il y est précisé que les plus importants sont l'étalement urbain et la dépendance à l'automobile. En effet, l'arrivée de l'automobile a permis le développement des terres en périphérie de plusieurs centres urbains puisqu'elle réduisait de beaucoup les temps de déplacement. Une partie de la population a alors été attirée vers ces zones qui permettaient d'éviter les inconvénients de la ville-centre, soient principalement les pollutions sonore et atmosphérique ainsi que le manque d'espace. Cette dynamique a surtout été observée dans les villes australiennes, canadiennes et états-uniennes puisque les terres dans leurs périphéries étaient abondantes et abordables, ce qui a provoqué leur urbanisation rapide. La structure spatiale de ces nouveaux quartiers a été basée sur l'automobile, ce qui en a fait le mode de transport dominant. Autrement dit, l'arrivée de l'automobile a encouragé le développement du territoire de manière diffuse et peu dense, ce qui a rendu le recours aux autres modes de transport difficile, voire impossible (Gudmundsson et Höjer 1996). Le tout s'avère particulièrement frappant aux États-Unis qui ont aujourd'hui l'un des plus hauts taux de motorisation au monde avec environ une voiture pour deux personnes, et où 88% des déplacements s'y font en automobile (Rodrigue 2016). On y trouve 30% de la flotte automobile mondiale contre 5% de la population mondiale (DeCicco, Fung et An 2006). Cela confirme le rôle primordial qu'a joué et joue encore la voiture dans l'étalement des villes nord-américaines, ce qui a mené à la création intensive de banlieues de plus en plus éloignées et à des milieux de vie de faible densité (TRB 2010).

L'influence de l'arrivée de l'automobile sur le développement des zones urbaines a malgré tout été relativement faible à certains endroits du monde, comme dans quelques villes européennes, japonaises et chinoises. En effet, ces territoires qui ont été urbanisés il y a des siècles ont hérité de systèmes de transport principalement axés sur la marche et le transport en commun, ce qui permet à leurs résident.e.s d'effectuer encore aujourd'hui entre 33 et 66% de leurs déplacements

par ces modes Rodrigue (2016). De plus, la faible quantité de terres disponibles et les caractéristiques géographiques de ces zones ne permettaient pas un étalement marqué.

Ainsi, le succès de l'automobile s'explique principalement par la grande vitesse, la flexibilité et la liberté qu'elle offre (Hensher et Reyes 2000). Par contre, comme précisé par Dupuy (1999), les efforts continus des autorités pour l'accommoder (objet de la prochaine section) ont également aidé à créer un contexte qui a favorisé l'utilisation de l'automobile. D'autres facteurs expliquent également le succès de l'automobile, comme le prestige qu'elle confère ainsi que la hausse des revenus et du temps de loisir des ménages (Rodrigue 2016). Finalement, la sous-tarification de l'utilisation d'une automobile est aussi associée à une plus grande dépendance à l'automobile; en ce sens, son coût réel d'utilisation n'est pas supporté par ses utilisateurs et utilisatrices, mais est plutôt externalisé (Golinska et Hajdul 2012). Il s'agit là du paradoxe de l'automobile qui est devenue le mode de transport dominant, mais qui est de plus en plus liée à des perturbations locales et globales comme il le sera présenté dans la section 1.2.4 (*Les enjeux de la mobilité*).

1.2.3 Approche traditionnelle en planification des transports

L'approche traditionnelle en planification des transports vise à prévoir la demande en transport et d'y répondre par la construction de routes (Owens 1995 ; Vigar 2000), ce qui explique qu'elle soit nommée l'approche *predict and provide* (Owens 1995). Elle est en réponse directe à la forte augmentation de l'usage de l'automobile durant le 20^e siècle dans les pays développés, ce qui a mené à des investissements colossaux dans la construction d'infrastructures routières (Litman 2013). Dans bien des situations, ni l'espace ni le budget n'étaient des contraintes à l'augmentation de la capacité routière (Evans, Guy et Marvin 2001) puisque le transport était perçu comme un synonyme de compétitivité économique et de création de richesse (Vigar 2000). En effet, le transport est sous l'angle de cette approche considéré comme une « friction économique » et cette perte de ressource doit être minimisée (De Ceuster, Martens et Borken 2005). Pour ce faire, les temps de trajet doivent être réduits et la congestion doit être enrayerée (Banister 2008). Les indicateurs de performance des systèmes de transport sont la congestion, le temps de déplacement et surtout la vitesse moyenne (Black 2010). Ainsi, l'approche conventionnelle se concentre sur la construction d'infrastructures de transport pour accélérer la vitesse de déplacement et faciliter la circulation routière, ce qui a bénéficié presque uniquement à l'automobile (Gillis, Semanjski et Lauwers 2016). L'utilisation du transport en commun, de la

marche ou du vélo est alors devenue moins attrayante, ce qui a accentué encore davantage le recours à l'automobile (Banister 2008).

1.2.4 Enjeux liés à la mobilité

Cette section a pour but de présenter les enjeux liés à la mobilité découlant principalement de l'approche traditionnelle en planification des transports venant d'être présentée. Ces enjeux sont divisés en trois dimensions, soit environnementaux, sociaux et économiques.

1.2.4.1 Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux causés par le transport se rapportent principalement à la consommation d'énergie, à la pollution et à l'occupation du sol. Concernant la consommation d'énergie, l'enjeu majeur est la contribution du transport aux changements climatiques en raison des émissions de GES générées. En effet, en 2016, le secteur du transport a consommé 31,6% de l'énergie mondiale (AIE 2018) et cette énergie provenait en grande partie de ressources non renouvelables (Holden, Gilpin et Banister 2019). Il est estimé que 97% du transport utilise le pétrole comme carburant (Golinska et Hajdul 2012). Selon les estimations de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) dans leur rapport publié en novembre 2019, le transport est responsable de 24% des émissions mondiales de CO₂ et les trois quarts de ces émissions sont causés par le transport routier (AIE 2019). Le CO₂ représente 75% des GES mondiaux et est projeté pour rester le plus grand contributeur de GES en 2050 (Edenhofer 2015). Au Québec, en 2017 le transport a été la plus importante source de GES et en a généré 43% dont 34% par le transport routier (G. Québec 2019).

Le second impact environnemental majeur causé par le transport est la pollution. Cette pollution, principalement atmosphérique et sonore, peut également affecter l'eau, les sols, la luminosité et le paysage. Pour ce qui est de la pollution atmosphérique, selon Karagulian et al. (2015), le transport routier est la principale source de pollution de l'air et est responsable du quart des particules présent dans l'air à l'échelle mondiale. Ces polluants atmosphériques proviennent en grande partie des gaz d'échappement des véhicules (Canada 2017). Il s'agit du monoxyde de carbone (CO), des oxydes d'azote (NO_x et NO₂), de composés organiques volatils (COV), de particules fines (PM_{2,5} et PM₁₀), de dioxyde de soufre (SO₂) et d'ammoniac (NH₃). D'autres

polluants sont également émis comme certains métaux, le carbone noir (C noir) et les particules ultrafines (PM_{0,1}) (Baldauf et al. 2009). Les expositions à ces polluants ont des effets négatifs à court comme à long terme sur la santé humaine et affectent surtout les systèmes respiratoires et cardiovasculaires (Lebel et al. 2012). Ces effets peuvent aller de simples irritations et inflammations des voies respiratoires à l'asthme, bronchites, et même jusqu'au cancer des poumons (Pope Iii et al. 2002 ; Hoek et al. 2002). La pollution de l'air est reconnue pour causer 6% des décès en Europe, et la moitié de ceux-ci serait attribuable au transport motorisé (Künzli et al. 2000). De plus, selon Brauer, Reynolds et Hystad (2013) qui ont étudié les effets de la pollution de l'air causé par le transport sur la santé humaine au Canada, le risque de mort prématurée causé par la pollution de l'air est neuf fois plus élevé que par des accidents de la route.

Une autre nuisance produite par la circulation automobile est la pollution sonore. Comme indiqué par l'OMS, elle est considérée comme l'un des pires enjeux environnementaux (OMS 2011b). La pollution sonore est attribuable au bruit généré par les moteurs et celui du frottement des pneus des véhicules sur la chaussée. Elle peut générer des réponses physiologiques caractéristiques du stress et ainsi affecter la santé humaine (Bryan et Tempest 1973 ; Clark et Stansfeld 2007 ; Carrier 2015). Parmi les conséquences, citons les acouphènes, les problèmes de sommeil (Öhrström 1995 ; Jakovljevic, Paunovic et Belojevic 2009), l'anxiété, les maladies cardiovasculaires (Babisch 2015) et des problèmes de concentration (Poenaru et al. 1987). De plus, le bruit routier cause au moins un million d'années de vie saine perdue dans l'ouest de l'Europe chaque année (OMS 2011a). Ainsi, les pollutions atmosphérique et sonore représentent les deux plus grandes formes de pollutions environnementales associées au transport routier et minent la qualité de vie urbaine tout en impactant la santé humaine et l'économie (Mozos-Blanco et al. 2018 ; Rodrigue 2016). D'autres impacts ont également été recensés. Par exemple, Spellerberg (1998) a répertorié les multiples effets de la circulation routière sur la faune et la flore comme la dégradation de la photosynthèse, de la croissance des plantes et l'augmentation de la mortalité des animaux.

Le dernier grand impact environnemental relié au transport est son empreinte au sol. Aux États-Unis, plus de terres sont utilisées pour le transport que pour le logement et en Europe de l'Ouest les infrastructures de transport varient entre 15 et 20% de la surface urbaine (Rodrigue 2016). Dans les pays en voie de développement, cette proportion n'atteint par contre que 10%, mais cette proportion s'accroît avec l'augmentation de la motorisation (Rodrigue 2016). En effet, Vasconcellos (2014) a démontré que l'emprise au sol des infrastructures de transport varie d'un

facteur de quatre allant de 6,4% à Calcutta en Inde à 25% à Paris. Par leur grande emprise au sol, les infrastructures de transport provoquent l'imperméabilisation du sol (Fléchais 2011). L'eau s'écoule alors plus rapidement sur les surfaces asphaltées ou bétonnées ce qui augmente le débit maximal dans le réseau d'égout. Il y a de cette façon un danger de débordement et de refoulement. Ceci cause aussi de l'érosion et favorise le transport des polluants et sédiments affectant la qualité de l'eau (Fléchais 2011).

Les infrastructures de transport amplifient également l'effet des îlots de chaleurs (Akbari, Menon et Rosenfeld 2009). D'abord initiés par le climat, les îlots de chaleur sont intensifiés par le faible couvert végétal et la grande absorption de chaleur des routes et stationnements dus à leurs matériaux foncés (Asaeda, Ca et Wake 1996). La chaleur accablante causée par les îlots de chaleur peut provoquer un stress thermique, des malaises ou inconforts ce qui aggrave les maladies chroniques dont souffrent certaines personnes (Giguère 2009). Par exemple, il est estimé que la vague de chaleur de 2003 en Europe a causé entre 22 000 et 35 000 morts (Schär et Jendritzky 2004). Finalement, les infrastructures de transport entraînent une perte d'habitat naturel et les barrières physiques qu'elles créées fragmentent le territoire (Andrews 1990 ; Benítez-López, Alkemade et Verweij 2010).

1.2.4.2 Impacts sociaux

Les impacts sociaux relatifs au transport se rapportent principalement à la sécurité, à la santé et à l'iniquité. Pour ce qui est de la sécurité, environ 1,35 million de personnes sont tuées chaque année dans des accidents de la route, coûtant à la plupart des pays environ 3% de leur PIB (OMS 2018). Plus de la moitié des victimes sont des piéton.ne.s, cyclistes ou motocyclistes, bien qu'ils soient impliqués dans un bien plus faible proportion d'accidents (Graw et König 2002). Dans certains pays, la part de décès de piéton.ne.s et cyclistes dépasse les 75%, les piéton.ne.s étant le groupe le plus touché (OMS 2013). De plus, entre 20 et 50 millions de personnes subissent des blessures non mortelles lors d'un accident menant à une invalidité. Aussi, il s'agit de la première cause de décès pour les personnes âgées de 5 et 29 ans (OMS 2018). Au Québec, selon le bilan routier de 2018 de la Société de l'Assurance Automobile du Québec (SAAQ), le nombre de décès sur les routes a été de 359 – dont 10 décès de cyclistes et 69 piéton.ne.s –, il y a eu 1435 blessé.e.s graves et 33 716 blessé.e.s léger.ère.s (SAAQ 2018). Le nombre de décès sur les routes du Québec a malgré tout diminué de 1 850 depuis 1973 malgré les 4,4 millions de véhicules de plus en circulation (SAAQ 2018).

Le second impact social est lié à la santé. D'une part, comme présentée dans la précédente sous-section sur les impacts environnementaux, la pollution générée par la circulation automobile cause des préjudices à la santé humaine. D'autre part, il y a maintenant des évidences que l'utilisation de l'automobile est associée à un manque d'activité physique qui peut mener au surpoids et à l'obésité (J. Pucher et Dijkstra 2003). Autrement dit, à l'aube d'une « épidémie d'obésité » telle qu'annoncée par Lobstein (2004), le temps passé en automobile favorise l'obésité par la sédentarité et la réduction des niveaux d'activité physique (Davis, Valsecchi et Fergusson 2007 ; L. D. Frank, Andresen et Schmid 2004). À l'inverse, l'utilisation de modes de transport actifs, soit la marche et le vélo, permet d'augmenter la pratique d'activité physique et réduire ainsi les risques de maladies liées à l'obésité et les coûts associés. En effet, selon Edwards (2008) de 4 800\$ à 5 600\$ peuvent être économisés par personne en soins de santé grâce à une augmentation de huit minutes de marche par jour. De plus, la mobilité peut aussi être vécue comme aliénante (Wiel 1999), surtout à cause de la perte de temps dans la congestion, ce qui peut mener à des problèmes sociaux comme l'isolement ou l'augmentation du niveau d'agressivité (Underwood et al. 1999 ; Nesbit, Conger et Conger 2007). De plus, les piétons et cyclistes peuvent vivre des épisodes de stress causés par leurs grandes vulnérabilités et les risques réels ou perçus lors de leurs déplacements (Basford et al. 2002 ; Heesch, Sahlqvist et Garrard 2011). Il a également été démontré qu'une forte motorisation affecte la cohésion sociale en limitant le nombre de liens qu'une personne entretient dans son voisinage (Hart et Parkhurst 2011). Finalement, un recours intensif à l'automobile nuit aux communautés en restreignant l'indépendance des enfants (Davis et Jones 1996). En effet, tel qu'indiqué par Torres et al. (2019), les enfants allant à l'école en modes actifs ont une meilleure connaissance de leurs milieux que ceux qui sont conduits « passivement » à l'école dans un mode motorisé. De plus, l'auteur rappelle que « les enfants qui marchent ont un contact avec des environnements et des lieux d'activités du quartier (commerces) qui favorisent l'exploration, le jeu et le contact social » (Torres et al. 2019).

Le dernier impact social lié à la mobilité renvoie à l'iniquité entre les différents types d'usagers et usagères des systèmes de transport. En effet, dans la plupart des villes les systèmes de transport bénéficient surtout aux automobilistes tout en mettant un poids considérable sur les personnes utilisant les autres modes (Azetsop 2010 ; Graw et König 2002 ; Gwilliam 2003 ; Lucas 2012 ; Martens 2012 ; Mullen et al. 2014 ; Vasconcellos 2014). Cet enjeu est bien présenté dans l'article de Gössling (2016) intitulé *Urban transport justice*. En effet, la plupart des villes ont consacré une majeure partie de leurs infrastructures de transport à l'automobile (Gilbert, Perl et Banister 2007)

et les modes les moins avantageés sont souvent la marche et le vélo. Il y a trois dimensions où l'iniquité est apparente, soit l'exposition aux polluants (principalement atmosphériques et sonores) et aux risques de la circulation, la distribution de l'espace (en particulier le peu d'espace alloué aux modes de transports actifs comparativement à l'automobile), et la valorisation du temps de transport (Gössling 2016). De cette façon, l'accès aux activités, biens et services est inéquitable comme les bénéfices et les coûts sont distribués de manière différente entre les utilisateurs et utilisatrices des systèmes de transport (Holden, Gilpin et Banister 2019 ; de Freitas Miranda et da Silva 2012).

1.2.4.3 Impacts économiques

Les impacts économiques causés par l'automobile se rapportent principalement aux coûts liés à la congestion ainsi qu'aux dépenses publiques et privées. La congestion survient lorsque la demande dépasse la capacité des systèmes de transport à accueillir des véhicules (OCDE 2007). Ceci a pour effet de réduire l'efficacité des systèmes de transport et donc la vitesse de déplacement, ce qui cause des retards par rapport aux conditions normales de circulation (Lomax 1997). Elle est souvent causée par l'usage intensif de l'automobile et est maintenant considérée comme une contrainte majeure à la qualité de vie et l'efficacité des entreprises (Banister 2008). Une étude signale par exemple que la congestion coûte environ 1% du PIB mondial, ce qui freine l'économie, nuit à la santé et contribue activement à la dégradation de l'environnement et de la qualité de l'air (Cebr 2014). Les heures perdues sur les routes, les coûts associés à l'utilisation des automobiles et ceux se rapportant à la pollution générée sont comptabilisés dans ce calcul. À Montréal, les coûts de la congestion ont été évalués à 4,2 milliards en 2018 (Lévesque 2018).

Un autre impact économique relié au transport est le coût élevé associé à l'utilisation de véhicules motorisés, et ce, tant pour le gouvernement que pour les ménages privés. Le rapport *Évolution des coûts du système de transport par automobile au Québec* de T. Québec et Suzuki (2017) indique qu'au Québec en 2015 les dépenses gouvernementales (fédérales, provinciales et municipales) pour le transport automobile et les routes ont été de 6,6 milliards (excluant le transport collectif et des marchandises), ce qui représente une augmentation de près de 70% en 20 ans en dollars constants. Pour ce qui est des ménages, environ 37 milliards ont été dépensés pour l'automobile, soit une augmentation de 27,7% depuis 20 ans. Pour les ménages, ceci représente environ 20% de leurs dépenses, soit le deuxième poste budgétaire en importance après le logement et devant l'alimentation. À cela s'ajoutent d'autres externalités négatives

(congestion, pollution et accidents), évaluées à 7,6 milliards en 2015. Ainsi, en 2015, le transport automobile a coûté en tout et partout environ 51 milliards de dollars à la société québécoise, ce qui représente 13% du PIB.

Malgré ces enjeux environnementaux, sociaux et économiques, le parc automobile ne cesse de croître. En effet, le nombre de véhicules enregistrés dans le monde a été multiplié par sept entre 1960 et 2010, passant de 100 à 700 millions (Rode et al. 2017). Ce faisant, une part importante des 10 milliards de déplacements en zones urbaines chaque jour est effectuée en automobile. De plus, le nombre d'automobiles passera à 1,7 milliard en 2035 (AIE 2011) selon l'Agence Internationale de l'Énergie et à 2,6 milliards en 2050 selon les estimations de Wright et Fulton (2005). Cette augmentation est principalement causée par la démocratisation de l'automobile et à l'urbanisation rapide dans les pays en voie de développement, surtout en Chine (Wright et Fulton 2005). En 2050, le nombre d'automobiles en Chine est projeté entre 486 et 662 millions (UNEP 2011). Au Québec, le nombre de véhicules en circulation est passé de près de 2 110 000 en 1978 à plus de 4 758 000 en 2017 (SAAQ 2017). Dans la Région métropolitaine de Montréal et ses environs, ce nombre a augmenté de 5% entre 2013 et 2018 (ARTM 2020). De plus, 68% des déplacements sont effectués en automobile en période de pointe du matin, ce qui représente par contre une légère baisse de 1% depuis 2013 (ARTM 2020).

1.2.5 Planifier la mobilité de demain : un défi de taille pour les autorités

Ainsi, la croissance de la population mondiale, l'urbanisation rapide et la mondialisation de l'économie des dernières décennies ont provoqué une augmentation soutenue de la quantité de personnes et de biens se déplaçant en zones urbaines, et ce, pour soutenir la prospérité économique et le bien-être social (Lyons 2018). En effet, selon Van Audenhove et al. (2014), 64% de tous les déplacements se font en zones urbaines et le total de kilomètres qu'on y parcourt triplera d'ici 2050. Par conséquent, la demande de mobilité s'est concentrée et se concentrera encore davantage dans les villes; de la sorte, les sociétés deviennent de plus en plus dépendantes de leurs systèmes de transport urbain pour supporter leurs activités (Rodrigue 2016). Ce faisant, la gestion du transport urbain se complexifie par la diversité des modes de transport utilisés, des types d'activités effectués, par les nombreux lieux d'origine et de destination ainsi qu'aux grands volumes de circulation. Cette pression croissante sur les systèmes de transport se reflète dans les nombreux enjeux liés à la mobilité venant d'être présentés.

La mobilité est donc un défi important pour les autorités urbaines qui ont des capacités limitées, tant sur le plan des ressources financières que de l'espace pour répondre à la croissance constante du mouvement des personnes et des marchandises sur leur territoire (Gudmundsson et Höjer 1996). Toutes ces observations ont mené à la conclusion que les systèmes de transport ne sont pas durables dans la grande majorité des villes et que des changements majeurs dans les politiques et pratiques sont nécessaires (Banister 2005 ; Black 2010 ; Arsenio, Martens et Di Ciommo 2016 ; Schwanen, Banister et Anable 2011). Tel que précisé par Pouyanne (2004, 2) « [i]l s'agit alors de briser [le] cercle vicieux où l'automobile, par les gains de vitesse qu'elle procure, a permis une extension considérable du périmètre urbanisé, et où en retour cette dilatation de l'espace renforce – voire rend nécessaire – le recours à l'automobile ».

1.2.6 Changement de paradigme en planification des transports

Plusieurs chercheur.e.s ont observé un changement de paradigme dans la planification des transports depuis la fin du 20^e siècle (Arsenio, Martens et Di Ciommo 2016 ; Banister 2008, 2012 ; Hull 2008 ; Gillis, Semanjski et Lauwers 2016 ; de Freitas Miranda et da Silva 2012 ; Litman 2013 ; Owens 1995 ; Vigar 2000). Selon Vigar (2000), la logique traditionnelle de planification des transports a été remise en question dans les années 1990, en raison de deux constats majeurs. Premièrement, l'augmentation de la capacité routière augmente la congestion. Deuxièmement, les budgets autrefois alloués à la construction de nouvelles routes sont grugés par les coûts d'entretien du réseau routier existant. De plus, les deux principes fondamentaux de la planification des transports traditionnelle ont été contestés (Banister 2008). Tout d'abord, le transport n'est plus uniquement perçu comme un coût, mais de plus en plus comme une activité pouvant aussi être valorisée grâce à la hausse des revenus, du temps de loisir et aux nouvelles technologies (Mokhtarian, Salomon et Handy 2006 ; Schlich et al. 2004). Ensuite, les nouvelles politiques de transport ne visent plus la minimisation du temps de parcours, mais plutôt la fiabilité des réseaux routiers et l'atteinte d'un temps de parcours raisonnable (Noland et Polak 2002). L'efficacité des systèmes de transport n'est alors plus basée uniquement sur la vitesse de déplacement. Cette nouvelle approche repose aussi sur l'idée que la demande toujours grandissante pour une mobilité motorisée doit être contrôlée plutôt que d'y répondre par l'approche traditionnelle (Hull 2008). Les effets négatifs du transport commençant à être plus importants que ses effets positifs, l'approche traditionnelle n'était donc plus acceptable (Holden, Gilpin et Banister 2019). Ce contexte a permis l'émergence du concept de mobilité durable.

1.3 Mobilité durable

1.3.1 Historique et définition

Selon Meunier et Zéroual (2006), le concept de mobilité durable est apparu officiellement en 1991 dans le cadre de la Conférence européenne des Ministres des Transports (CEMT). On lui confère alors une définition proche de celle du rapport Brundtland en s'inspirant des trois piliers traditionnels du développement durable (environnemental, social et économique). La mobilité durable est également présente dans le *Green Paper on the Impact of Transport on the Environment* publié en 1992 par la Commission européenne (CE 1992). Il s'agit d'une déclaration qui se concentrait principalement sur les impacts environnementaux causés par le secteur du transport. C'était la première fois que la mobilité durable apparaissait dans un agenda international (Holden, Gilpin et Banister 2019). Le transport y est d'ailleurs présenté comme « un contributeur majeur aux problèmes d'énergies et environnementaux puisqu'il s'agit d'un des principaux consommateurs de combustibles fossiles responsables de nuisances et de dommages environnementaux considérables [traduction libre] » (CE 1992, 2).

Depuis ses débuts, il y a maintenant presque trente ans, la compréhension et l'interprétation du concept de mobilité durable ont beaucoup changé. Holden, Gilpin et Banister (2019) ont tracé son évolution au travers de quatre générations distinctes. La première génération (1992-1993) était centrée sur la technologie et focalisait ses efforts sur la réduction des effets environnementaux négatifs du transport. La seconde, troisième et quatrième générations (1993-2000, 2000-2010 et 2010-2018) sont caractérisées par un accroissement de la reconnaissance des limites des efforts précédents pour parvenir à une mobilité plus durable. De la 2^e à la 4^e générations, il y a aussi eu une ouverture de plus en plus importante envers des solutions plus diversifiées. Ces générations sont ainsi devenues de plus en plus interdisciplinaires, reflétant ainsi la relation complexe entre la mobilité et les autres aspects de la société.

Le Centre pour un Transport Durable (CTD 2005, dans Siou (2014, 16)) a défini qu'une mobilité durable :

- « 1. permet aux individus et aux sociétés de satisfaire leurs principaux besoins d'accès et de développement d'une manière sécuritaire et compatible avec la santé des humains et des écosystèmes, de façon équitable entre les individus d'une génération et entre les générations ;

2. est abordable, fonctionne efficacement, offre un choix de moyens de transport et soutient une économie dynamique ;
3. limite les émissions et les déchets à la capacité de la planète de les absorber, minimise la consommation de ressources non renouvelables, limite la consommation de ressources renouvelables dans le respect des principes de développement durable, réutilise et recycle ses composantes et minimise l'utilisation des terres et les émissions sonores. »

La mobilité durable fait face à plusieurs défis. Parmi elles, mentionnons la dépendance aux énergies fossiles et à l'automobile, la faible utilisation des véhicules soit l'autosolo (1,25 passager/voiture), le vieillissement de la population, le manque d'efficacité du transport en commun ainsi que la faible internalisation des coûts sociaux et environnementaux dans l'utilisation des systèmes de transport (Golinska et Hajdul 2012). À cela s'ajoute l'importance du discours des dernières décennies sur les bénéfices économiques du transport motorisé (Imran et Pearce 2015) qui provoque un manque de volonté politique et de support public (Bratzel 1999). Les coûts importants qu'engendrerait une restructuration des infrastructures de transport sont également un frein à la mobilité durable (Gössling et Choi 2015).

1.3.2 Différences avec l'approche traditionnelle

Le tableau 1 permet de bien saisir la différence entre l'approche traditionnelle en planification des transports et celle de mobilité durable.

Tout d'abord, la nouvelle approche est basée sur l'accessibilité et non uniquement sur la mobilité. De plus, elle intègre les dimensions sociales et environnementales et est centrée sur les personnes qu'elles soient à bord ou non d'un véhicule. Ainsi, tous les modes sont considérés et ils sont hiérarchisés de façon à ce que la marche et le vélo soient plus favorisés que l'automobile. Le plus grand changement est certainement l'intégration de la planification urbaine dans les politiques de transport. Pour Arsenio, Martens et Di Ciommo (2016), les problèmes de congestion récurrents dans les villes sont causés par une longue absence de planification intégrant à la fois le transport et l'utilisation du sol. En effet, lorsque bien intégrée avec des investissements en transport la planification urbaine est essentielle pour favoriser un haut niveau d'utilisation du transport en commun, de la marche et du vélo (Hickman, Hall et Banister 2013). Selon le rapport *Better Growth, Better Climate* publié en 2014 par la *New Climate Economy Commission*, une bonne planification urbaine a le potentiel de réduire les émissions de CO₂ de 1,8 milliards de

tonnes par année tout en assurant une plus résilience des villes aux changements climatiques (N Stern et Calderon 2014). De plus, les recherches de Erickson et Tempest (2015) ont démontré que plus du tiers du budget carbone mondial peut être influencé par des politiques de planification urbaine.

Tableau 1. Approches contrastantes en planification des transports

Approche traditionnelle	Mobilité durable
Mobilité	Accessibilité
Dimensions physiques	Dimensions sociales et environnementales
Objectif principal centré sur la circulation automobile	Objectif principal centré sur les personnes avec ou sans automobile
La rue est une route	La rue est un espace
Transport motorisé	Tous les modes de transport selon une hiérarchie plaçant les piétons et cyclistes en priorité et l'automobile en dernier
Évaluation économique	Analyse multicritère prenant en compte les préoccupations environnementales et sociales
Déplacement comme une demande dérivée	Déplacement comme une demande dérivée et comme une activité pouvant être valorisée
Basée sur la demande	Basé sur la gestion de la demande
Hausser la vitesse de circulation	Ralentir la vitesse de circulation
Minimiser les temps de parcours	Offrir un temps de parcours fiable et raisonnable
Se concentre sur le déplacement	Se concentre sur la destination
Politique de transport	Politique de transport et de planification urbaine

Sources : traduit et adapté de Marshall (2001, tableau 9.2) dans Banister (2008, tableau 1).

Un exemple permettant de comprendre la différence entre les deux types de planification est la gestion d'un problème de congestion autour d'une école (Litman 2017). L'ancienne approche qui est basée sur la mobilité pourrait conclure qu'il faut mettre en place des mesures pour augmenter la capacité routière ou que l'amélioration du transport scolaire est nécessaire. Par contre, ces mesures qui augmenteront la circulation routière créeront une barrière pour les modes actifs, ce qui fera diminuer leur niveau d'accessibilité. L'analyse du même problème avec la nouvelle approche, qui est basée sur l'accessibilité, conduit à la prise en compte d'une gamme de solutions plus vaste, telle la mise en place de supports à vélos et de douches pour accommoder les cyclistes, des incitations au covoiturage ou même de décaler l'heure de début des cours pour certaines classes ou d'offrir des cours en ligne. Ainsi, planifier en termes d'accessibilité revient à s'intéresser à la finalité du déplacement et aux personnes plutôt qu'aux déplacements et aux systèmes de transport.

1.3.3 Champs d'actions

Dans l'article clé *The sustainable mobility paradigm* de Banister (2008), qui est l'auteur le plus cité et faisant autorité sur le sujet (Gillis, Semanjski et Lauwers 2016), la mobilité durable repose sur quatre champs d'action.

Premièrement, le besoin de se déplacer doit être réduit pour diminuer le nombre de déplacements. Pour ce faire, un déplacement peut être substitué par une activité ne nécessitant pas de se déplacer ou par l'utilisation d'une technologie.

Deuxièmement, les distances parcourues doivent être réduites. Pour ce faire, des modifications dans la planification et la forme urbaines sont nécessaires pour augmenter la densité résidentielle et la concentration d'activités, pour diversifier les usages du sol et pour aider à mieux concevoir les réseaux de rues. En effet, tel que décrit précédemment, il est devenu évident que le problème n'est pas uniquement lié au transport, mais aussi à la forme urbaine et à l'utilisation du sol (Holden, Gilpin et Banister 2019).

Troisièmement, une plus grande efficacité des systèmes de transport doit être encouragée pour s'assurer d'utiliser la meilleure technologie possible en matière d'efficacité énergétique, d'énergie propre et de diminution d'émissions polluantes. En ce sens, la décarbonisation du transport est un objectif important de la mitigation des effets des changements climatiques et de la mobilité durable (Zawieska et Pieriegud 2018).

Quatrièmement, un transfert modal doit être encouragé : l'usage de l'automobile doit être réduit et la marche, du vélo et du transport en commun doivent être favorisés. Il s'agit d'ailleurs de l'objectif de plusieurs politiques de transports contemporaines (Babalik-Sutcliffe 2013) puisqu'il est désormais largement admis que les modes actifs et le transport en commun ont un rôle important à jouer dans la mobilité durable (J. R. Pucher et Buehler 2012). D'une part, ceci peut notamment être atteint en ralentissant la circulation automobile, en réaffectant l'espace urbain au transport en commun, par la gestion de la demande ou la tarification routière. D'autre part, comme précisé par Banister (2008, 76), « un transport sain implique de grandes actions pour séparer les gens du trafic motorisé et d'avoir des routes exclusives pour les piétons et cyclistes [traduction libre] ». Ainsi, les villes doivent être aménagées de façon à rendre l'utilisation des modes actifs plus attrayante et celle de la voiture moins attrayante. C'est précisément là que le concept d'intérêt de cette recherche, soit celui de la perméabilité filtrée est particulièrement attrayant.

1.4 Perméabilité filtrée

1.4.1 Perméabilité et connectivité

Les termes perméabilité et connectivité sont souvent utilisés pour faire référence à la même notion (S. Marshall 2005). Par contre, nous sommes d'avis que la notion de connectivité est en fait une dimension de celle de perméabilité. Ils sont donc reliés, mais réfèrent à deux aspects distincts d'un réseau. En effet, selon W. E. Marshall, Piatkowski et Garrick (2014), un réseau de transport est caractérisé par trois dimensions, à savoir :

- la **densité** qui qualifie l'intensité de la présence du réseau sur le territoire;
- la **configuration** qui réfère à la topologie du réseau, soit à la relation entre ses différents constituants;
- la **connectivité** qui renvoie au degré par lequel les différents nœuds et liens d'un réseau sont connectés entre eux.

Par contre, la perméabilité est définie comme la capacité d'un réseau à permettre le mouvement (Stangl 2019). La perméabilité est donc une notion plus générale et peut être conçue comme le but ultime d'un réseau de transport (Dill 2004). C'est pourquoi dans le cadre de cette recherche, il est établi que la perméabilité est la notion englobant ces trois dimensions.

1.4.2 Définition et critiques

Le terme « perméabilité filtrée » a été proposé par Steve Melia (2008) et utilisé officiellement pour la première fois en 2008 dans les orientations du gouvernement britannique pour leur programme de villes écologiques (TCPA 2008). Il a également été endossé dans la déclaration *Take Action on Active Travel* signée par 106 organisations – très majoritairement britanniques – concernées par les enjeux de santé publique et de planification des transports (Sustrans 2008). Il intègre depuis progressivement le lexique de la planification des transports et on peut aussi y faire référence par l'emploi du terme *modal filtering* (Aldred, Croft et Goodman 2019) ou « accessibilité filtrée » (Zvi 2016).

Le concept de perméabilité filtrée vise à ce que les réseaux de transports actifs soient plus perméables que celui pour l'automobile (Melia 2008), et donc qu'ils permettent une plus grande liberté de mouvement. L'objectif est de favoriser la pratique du vélo et de la marche en créant un environnement où ces modes sont tout aussi voire plus efficaces que l'automobile. Pour ce faire, le réseau accessible aux piéton.ne.s et cyclistes doit être plus dense, étendu et connecté, ce qui a pour effet de « filtrer » l'automobile. Autrement dit, les piéton.ne.s et cyclistes doivent bénéficier d'un réseau exempté des contraintes s'appliquant à l'automobile, le niveau de perméabilité filtrée dépendant alors de l'importance de ces contraintes et exemptions. On espère que plus ce niveau est élevé sur un territoire, plus le transport actif y sera privilégié puisqu'il se présentera comme l'option la plus avantageuse pour y effectuer des déplacements. En ce sens, le principe de perméabilité filtrée peut permettre de procéder à un « rééquilibrage » dans l'attractivité des modes de transport (Aldred et Croft 2019), tout comme à une « désautomobilisation » des villes pour reprendre le terme de Pouyanne (2004). Bien que le principe de perméabilité filtrée vise à la fois les piéton.ne.s et cyclistes, nous nous focalisons ici sur le vélo puisqu'il s'agit d'un mode reconnu pour être efficace dans la majorité des déplacements en zones urbaines (Fishman 2016); et ainsi comme un mode plus compétitif que la marche face à l'automobile.

Bien que l'on n'y fasse pas référence par l'emploi d'un terme précis, il est intéressant de préciser que le principe de perméabilité filtrée est bien établi dans les modèles utilisés pour la planification des infrastructures de transport en commun (Melia 2012). En effet, l'avantage qu'offrirait un potentiel corridor de transport en commun par rapport au réseau routier existant y est considéré. Par contre, ce même principe est bien moins accepté et établi lorsqu'appliqué à la planification du réseau cyclable.

La notion de perméabilité filtrée est en opposition directe avec la perméabilité dite « non filtrée » qui est très présente à travers le monde, plus particulièrement en Amérique du Nord (Melia 2012). Un territoire caractérisé par une perméabilité non filtrée offre la même liberté de mouvement aux cyclistes et automobilistes puisque le réseau auquel ils ont accès est le même. Le meilleur exemple d'un réseau non filtré est certainement la grille. En effet, bien qu'un réseau sous forme de grille réduise les distances à parcourir à la marche ou à vélo, il le fait également pour l'automobile. Comme le précise Rietveld et Daniel (2004), là où tous les types d'usagers et d'usagères de la route se déplacent ensemble l'automobile va souvent émerger comme l'option la plus rapide et efficace.

Il convient de signaler que l'approche de perméabilité filtrée fait l'objet de deux critiques principales. Seule la pratique du vélo serait avantagée au détriment des autres modes (Aldred,

Croft et Goodman 2019) et elle pourrait générer une forte congestion sur certains axes où sont refoulés les automobilistes (Aldred et Croft 2019). Toutefois, une analyse de la circulation automobile dans la ville de Walthamstow à Londres à la suite de la mise en place de plusieurs mesures de perméabilité filtrée a démontré que le phénomène est plutôt inverse (Lydall 2016). En effet, un important transfert modal a permis de réduire de 56% le nombre d'automobiles sur 12 routes principales, de 16% sur les routes périphériques, ce qui représente environ 10 000 automobiles de moins sur les routes de cette ville par jour. Une petite augmentation de la circulation automobile a été observée sur deux routes périphériques. De plus, de manière générale toute action visant à restreindre l'utilisation des véhicules motorisés privés fait habituellement face à une résistance en raison d'un attachement à la conduite automobile (Domarchi, Tudela et González 2008 ; Tertoolen, Van Kreveld et Verstraten 1998).

1.4.3 Facteurs influençant le niveau de perméabilité filtrée

Différentes stratégies sont utilisées pour augmenter le niveau de perméabilité filtrée sur un territoire, et ce, à différents échelles et niveaux d'intensité. Elles peuvent être appliquées autour d'un lieu précis (école, parc, commerce, etc.), sur un axe de circulation ou au sein d'une zone allant d'un îlot à un quartier, à une ville.

Une classification des mesures permettant d'influencer le niveau de perméabilité filtrée est proposée dans le tableau 2. Quatre mesures principales et une secondaire y sont définies. Elles peuvent aussi être qualifiées de *modal filters* puisque leur objectif est de faciliter le plus possible le mouvement des cyclistes et de réguler celui des automobiles (Aldred et Croft 2019). Pour ce faire, les mesures de perméabilité filtrée peuvent être d'ordre physique, légal ou temporel. Chaque mesure est davantage approfondie par la suite. La classification des mesures de perméabilité filtrée est en grande partie une interprétation personnelle, mais s'inspire quelque peu de Infinity (2018) et Sustrans (2015).

Tableau 2. Mesures de perméabilité filtrée

Mesures	Description
Route additionnelle ^a	Présence de routes uniquement réservées aux cyclistes (exemple : voies cyclables en site propre).
Obstacles physiques ^a	Aménagement d'obstacles physiques permettant de limiter l'accès à certains tronçons de rue aux automobiles tout en permettant le passage des cyclistes (exemple : poteaux, bloc, clôture, barrière, etc.) ; peut créer l'effet d'un cul-de-sac seulement pour les véhicules motorisés.
Signalisation ^a	Signalisation pour restreindre l'accès à un tronçon de rue aux véhicules motorisés, mais pas pour les cyclistes (exemple : interdiction de virage à gauche, circulation locale seulement, etc.).
Sens unique ^a	Présence de rues à sens unique pour la circulation automobile, mais pas pour les cyclistes.
Mesures d'apaisement de la circulation ^b	Aménager les rues et les intersections de façon à prioriser le vélo et contrôler les comportements des automobilistes (croisement dénivelé, dos d'âne, priorité aux intersections, marquage au sol, gestion des limites de vitesse, etc.) ; a pour objectif d'augmenter le confort des cyclistes.

^a Mesures principales. ^b Mesure secondaire.

Les mesures de perméabilité filtrée permettent de créer un environnement urbain plus propice à la pratique du vélo en offrant aux cyclistes des trajets plus courts. Malgré tout, il ne s'agit pas là du seul bénéfice de ces mesures. Elles permettent également d'augmenter le confort et le sentiment de sécurité des cyclistes en contribuant à réduire le volume et la vitesse de la circulation motorisée, soit deux facteurs connus pour décourager le cyclisme (P. Schepers et al. 2017). Par exemple, des mesures de perméabilité filtrée (obstacles physiques, signalisation, sens unique, etc.) peuvent être appliquées dans une zone résidentielle pour éliminer la circulation de transit et créer un environnement plus sécuritaire (Aldred 2015). Aussi, elles peuvent permettre de limiter les interactions entre les cyclistes et les véhicules motorisés en offrant une séparation entre ceux-ci. La pratique du vélo est alors d'autant plus favorisée puisque la peur d'être blessé par une automobile en est un frein important (Winters et al. 2011 ; Sanders 2015).

1.4.3.1 Mesures principales

La première mesure de perméabilité filtrée principale est la présence de voies de circulation en site propre et réservées aux cyclistes. Il s'agit d'infrastructures cyclables isolées de la circulation motorisée pouvant par exemple se situer au travers de parcs, de grands îlots, d'espaces publics, entre des culs-de-sac ou permettre de franchir des barrières physiques comme des cours d'eau, des chemins de fer et des autoroutes. Lorsque judicieusement positionnées, ces

voies peuvent augmenter significativement le niveau de perméabilité filtrée et ainsi offrir les meilleurs itinéraires aux cyclistes.



Figure 2. Exemple de route additionnelle comme mesure de perméabilité filtrée (infrastructure cyclable le long du canal Lachine à Montréal)

Source : Google Maps.

La deuxième mesure de perméabilité filtrée principale est l'aménagement d'obstacles physiques pour limiter l'accès à certains tronçons de rue aux automobiles tout en permettant le passage des cyclistes. Ces obstacles peuvent être sous forme de poteaux, que l'on peut aussi nommer comme étant des bornes, balises, bollards ou délinéateurs. Il peut aussi s'agir de *refuge island*, soit de petites sections de trottoir situées au centre d'une intersection où les cyclistes peuvent s'arrêter avant de finir la traversée d'une route. Des blocs de béton ou de plantes, des clôtures, des barrières ou tout autre élément pouvant empêcher une automobile de circuler, mais laissant passer les piétons et cyclistes peuvent également être utilisés. Ces obstacles peuvent être permanents ou temporaires, pouvant ainsi être retirés pour rouvrir le tronçon au besoin. Par exemple, certains types de bollards sont rétractables et un système contrôlé par les véhicules d'urgence permet de les enfoncer dans le sol pour autoriser leurs passages. Les obstacles physiques sont habituellement placés d'un seul côté d'un tronçon de rue et ne provoquent donc pas la fermeture complète d'une rue.



Figure 3. Exemple d'un obstacle physique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Malmö en Suède)

Source : Melia (2015, figure 7.3).

Comme on peut voir sur la figure 3, l'accès au tronçon de la route est bloqué aux automobiles, contrairement aux cyclistes et piétons. Ainsi, le réseau leur offre un avantage et rend l'environnement plus attrayant pour ces derniers. De plus, les obstacles physiques sont peu coûteux et simples à implanter (CHIPS 2016).

La troisième mesure de perméabilité filtrée principale est la signalisation qui peut être présente pour interdire l'accès à un tronçon de rue uniquement aux véhicules motorisés. Tout d'abord, il peut s'agir d'une restriction totale ou uniquement pour un certain type de virage (souvent à gauche). Cette restriction peut aussi être temporelle, en interdisant par exemple l'accès durant l'heure de pointe du matin. Elle peut également s'appliquer à un certain type de véhicule en fonction de sa classe, de sa hauteur, de sa largeur, de son poids, ou de sa fonction (permettant uniquement les livraisons locales par exemple).



Figure 4. Exemple de signalisation comme mesure de perméabilité filtrée (Ville de Montréal)

Source : Google Maps.

Ainsi, comme on peut l'observer sur la figure 4, l'accès au tronçon de rue est permis uniquement pour les autobus et les vélos, ce qui offre un avantage à ces deux modes comparativement à l'automobile.

La quatrième et dernière mesure de perméabilité filtrée principale est la présence de rues à sens unique pour la circulation automobile, mais pas pour les cyclistes. Cela a pour effet d'augmenter la perméabilité du réseau accessible en vélo tout en limitant celle du réseau automobile. Cette mesure peut être utilisée dans les zones résidentielles pour réduire la circulation de transit lorsque le sens de circulation des rues ne permet pas facilement de rejoindre les grandes artères. Par exemple, cela a été mis en place dans une zone résidentielle de la ville de Walthamstow à Londres comme le démontre la figure 5. La figure 6 représente une rue qui est à sens unique pour la circulation automobile, mais à double sens pour les cyclistes. Ainsi, il y a uniquement un point d'entrée dans la zone résidentielle, ce qui limite la circulation de transit. L'ensemble des rues de la zone sont par contre praticables dans les deux directions pour les cyclistes.

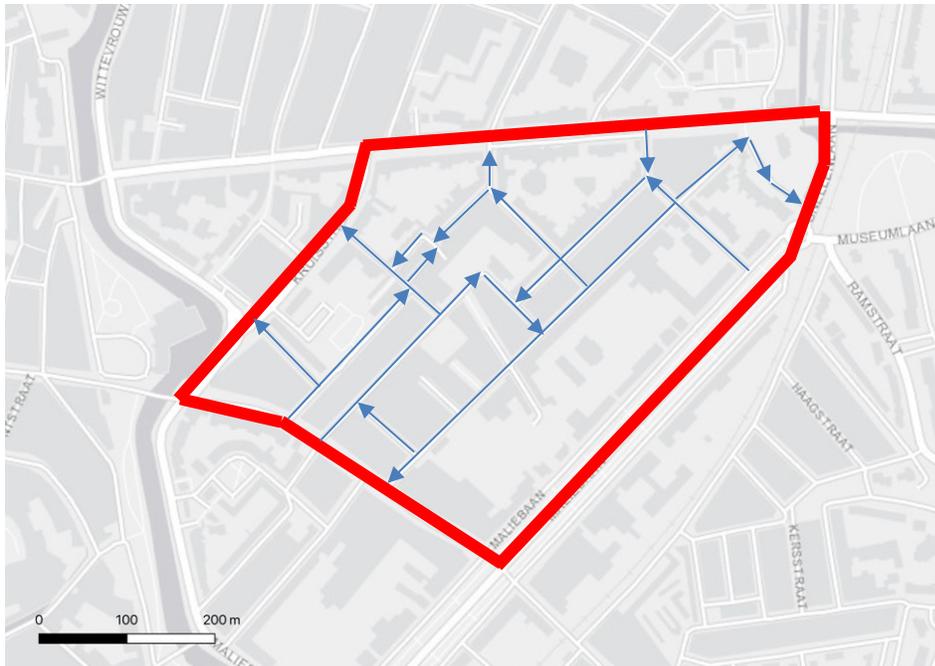


Figure 5. Exemple de voie à sens unique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Walthamstow à Londres) ; les lignes rouges indiquent les frontières de la zone et les lignes bleues le sens de circulation automobile des rues
 Source : Carte produite dans QGIS.



Figure 6. Exemple de sens unique comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Montréal)
 Source : Google Maps.

1.4.3.2 Mesures secondaires

Les mesures d'apaisement de la circulation sont définies comme des mesures secondaires puisqu'elles ont une influence moins directe sur le niveau de perméabilité filtrée d'un réseau. Elles peuvent être utilisées en complémentarité des quatre mesures principales pour maximiser leur efficacité, et ce, surtout en augmentant le confort des cyclistes.

L'apaisement de la circulation consiste à aménager les rues de façon à contrôler le comportement des automobilistes. Tel que le Conseil régional de l'environnement de Montréal le précise Cremtl (2006, 8), « [elle] permet de réduire la vitesse des véhicules automobiles, de dissuader la circulation de transit dans les rues résidentielles, de favoriser un partage des voies entre les différents modes de déplacement, de minimiser les conflits entre les usagers de la rue et, en conséquence, de rendre un quartier plus convivial ». Ces mesures peuvent être regroupées en trois catégories (les déviations horizontales, les déviations verticales et la signalisation) et être appliquées tant au niveau des rues que des intersections. Améliorer la sécurité des intersections est important puisque la majorité des accidents impliquant un.e cycliste et une automobile s'y concentrent (J. Schepers et al. 2011). Le tableau 3 présente les principales mesures d'apaisement de la circulation.

Des lignes d'arrêts avancées, des zones d'arrêts pour vélo (*bike boxes*) ou une signalisation permettant aux cyclistes de repartir avant les automobilistes pour les rendre plus visibles représentent d'autres mesures (Dill, Monsere et McNeil 2012). De plus, P. Schepers et al. (2017) recommandent un dégagement entre 2 et 5 mètres aux intersections pour assurer une bonne distance de visibilité. Ils préconisent également une réduction de la vitesse autorisée puisque ceci aurait permis de prévenir 2,5% du nombre d'accidents mortels impliquant des cyclistes à une intersection sans signalisation aux Pays-Bas. Malgré tout, la meilleure approche pour éliminer les conflits potentiels et le temps d'attente aux intersections reste un croisement dénivelé (figure 7). Il s'agit d'un tunnel ou d'une passerelle permettant à un.e cycliste de se déplacer sous ou au-dessus d'un autre axe de circulation, évitant ainsi tous les enjeux rattachés à une intersection.

Tableau 3. Mesures d'apaisement de la circulation

Type de mesure	Brève description
Déviaton horizontale	<u>Avancée de trottoir</u> Intrusion horizontale d'une bordure sur la chaussée ayant pour résultat de rétrécir un tronçon de voie.
	<u>Stationnement sur rue</u> Diminution de la voie disponible pour les déplacements automobiles en permettant le stationnement adjacent et parallèle à la bordure de la rue.
	<u>Chicane</u> Série d'avancées de bordures sur les côtés d'une voie qui la rétrécissent et exigent que les conducteurs changent de direction pour traverser la chicane. Typiquement, on utilise une série d'au moins trois avancées.
	<u>Terre-plein</u> Îlot surélevé construit sur l'axe central d'une voie à deux sens de circulation pour réduire la largeur totale des voies adjacentes.
	<u>Îlot circulaire</u> Terre-plein situé dans une intersection et utilisé pour empêcher des mouvements précis de circulation et diriger physiquement la circulation à travers une intersection.
Déviaton verticale	<u>Dos d'âne allongé</u> Partie surélevée d'une voie qui dévie à la fois les roues et le châssis du véhicule le traversant (en anglais <i>speed hump</i>). À ne pas confondre avec le dos-d'âne (<i>speed bump</i>).
	<u>Passage piéton surélevé / texturé</u> Passage piéton situé dans une intersection ou à mi-chemin entre deux rues, soit marqué et construit plus haut que la chaussée adjacente (surélevé), soit comportant une surface texturée ou dessinée en contraste avec la chaussée adjacente (texturé).
	<u>Prolongement de trottoir</u> Trottoir continué à travers l'intersection d'une rue locale. Un trottoir continué au même niveau, lorsque la chaussée est haussée au niveau du trottoir, est dit « surélevé » alors que le trottoir ramené au niveau de la chaussée est dit « abaissé ».
Signalisation	<u>Marquage au sol</u> Mise en place, par du marquage au sol, de mesures d'aménagement virtuelles (par exemple, terre-plein, passage piéton, espaces réservés au stationnement, etc).
	<u>Limite de vitesse</u> Gestion de la limite de vitesse autorisée.

Source : adapté de Cremtl (2006, tableau 1).



Figure 7. Exemple de croisement dénivelé comme mesure de perméabilité filtrée (ville de Houten aux Pays-Bas)

Source : Foletta (2011, figure 5).

1.4.3.3 Infrastructures cyclables

Les infrastructures cyclables peuvent aussi avoir un impact sur le niveau de perméabilité filtrée. Dans le tableau 4, nous avons reporté les quatre principaux types de voies cyclables (Furth 2012) ainsi que, selon nous, leurs impacts potentiels sur le niveau de perméabilité filtrée d'un réseau. La figure 8 présente ces types d'infrastructures cyclables.

Espace partagé



Bande cyclable



Piste cyclable séparée sur rue



Piste cyclable hors rue



Figure 8. Principaux types d'infrastructures cyclables

Source : Google Maps.

Tableau 4. Principaux types d'infrastructures cyclables et leurs impacts sur la perméabilité filtrée

Infrastructure cyclable	Caractéristiques	Impact sur le niveau de perméabilité filtrée
Espace partagé	Pas d'espace dédié, les cyclistes circulent avec la circulation motorisée.	Perméabilité non filtrée.
Bande cyclable	Marquage au sol indiquant l'espace pouvant être utilisé par les cyclistes aux côtés de la circulation motorisée.	Augmente le niveau de perméabilité filtrée si elle permet aux cyclistes de circuler dans les deux directions sur une route à sens unique. Corresponds à la 4 ^e (sens unique) et dans une moindre mesure à la 3 ^e (signalisation) mesure de perméabilité filtrée principale.
Piste cyclable séparée sur rue	Piste séparée physiquement par une barrière le long de la circulation routière.	Augmente le confort des personnes l'utilisant et le niveau de perméabilité filtrée si elle permet aux cyclistes de circuler dans les deux directions sur une route à sens unique ; correspond également à la 4 ^e (sens unique) et dans une moindre mesure à la 3 ^e (signalisation) mesure de perméabilité filtrée principale.
Piste cyclable hors rue	Infrastructure cyclable en site propre, c'est-à-dire isolée de la circulation motorisée.	Lorsque positionnées judicieusement, ces voies cyclables peuvent augmenter significativement le niveau de perméabilité filtrée ; correspond à la 1 ^{re} mesure de perméabilité filtrée principale (route additionnelle).

1.4.4 Lieux d'application

Plusieurs des villes avec les plus hautes parts modales de vélo sont caractérisées par une grande présence de mesures de perméabilité filtrée (Aldred, Croft et Goodman 2019 ; Melia 2015 ; P. Schepers et al. 2017). Majoritairement européennes, elles se situent notamment au Danemark, en Allemagne, aux Pays-Bas, en Belgique et en Suède (Melia 2015). Par exemple, dans les villes de Fribourg (Suisse), de Münster (Allemagne) et Groningue (Pays-Bas), la perméabilité filtrée est un élément clé de leur succès dans la promotion de la pratique du vélo utilitaire et dans la réduction de l'utilisation de l'automobile. Dans ces villes, la circulation automobile est canalisée sur un réseau limité de routes principales tandis qu'une multitude de mesures de perméabilité filtrée offrent une plus grande liberté de mouvement aux cyclistes. De plus, la réduction de la circulation automobile augmente la sécurité et crée des occasions pour améliorer les espaces publics et leurs dynamismes.

Par exemple, la Ville de Fribourg est considérée comme une pionnière de l'approche de perméabilité filtrée (De Marco 2019). En effet, dès les années 1970, leurs politiques de transport étaient fortement basées sur la mobilité active, ce qui a permis de concevoir une ville compacte et de courte distance dans laquelle la pratique du vélo est grandement avantagée par un réseau beaucoup plus dense et connecté que celui pour l'automobile. Résultat, près de 75% de la

population du quartier de Vauban dans la Ville de Fribourg vont au travail en vélo (Nobis 2003). La perméabilité filtrée est le principe central mobilisé par l'administration de Fribourg pour atteindre leur objectif consistant à ce que 80% des déplacements soient effectués par des modes durables (vélo, marche et transport en commun) (De Marco 2019).

D'autres villes comme Vancouver, Seattle (Washington), Portland et Bend (Oregon) sur la côte ouest de l'Amérique du Nord ou Auckland et Christchurch en Nouvelle-Zélande, ont également recours à l'approche de perméabilité filtrée pour mettre en place des *bicycle boulevards* (Ma et Dill 2015 ; Koorey 2012). Il s'agit de zones où des mesures de perméabilité filtrée permettent de connecter le plus directement possible et de manière sécuritaire les résident.e.s aux parcs, écoles, rues commerciales et autres destinations d'intérêt.

1.4.5 Impact sur la pratique du vélo

Très peu d'études ont tenté d'évaluer quantitativement l'effet du niveau de perméabilité filtrée d'un territoire sur la pratique du vélo. Cinq études ont été recensées à ce sujet.

Premièrement, Aldred, Croft et Goodman (2019) ont réalisé une étude longitudinale d'une année (2016-2017) sur les habitudes de mobilité de 1712 ménages habitant trois arrondissements londoniens où des interventions ont eu pour effet d'augmenter significativement le niveau de perméabilité filtrée. Ces trois arrondissements ont fait partie d'un programme nommé *Mini-holland* dont l'objectif était de protéger les utilisateurs vulnérables en s'inspirant de l'approche néerlandaise (Di Gregorio et Palmieri 2016). Ce programme devant se terminer en 2022 a prévu l'ajout de 97 nouvelles infrastructures dans les trois arrondissements. Parmi ces infrastructures, des voies séparées pour piéton.ne.s et cyclistes ont été aménagées sur les routes principales et des actions ont été posées pour réduire la circulation automobile dans les zones résidentielles. Les territoires à l'étude ont été divisés en zone ayant subi des changements significatifs (appelée *high-dose*) et en zone ayant subi des changements d'ordre mineur ou qui était toujours en cours (appelée *low-dose*). Les résultats démontrent une augmentation dans la mobilité active dans le groupe habitant les zones qualifiées de *high-dose*. En effet, il était 24% plus probable que cette population ait effectué un déplacement à vélo dans la dernière semaine par rapport à la population habitant un arrondissement de Londres n'ayant pas subi de transformation. De plus, en un an, leur temps de transport en modes actifs a augmenté de 41 minutes par semaine.

Deuxièmement, à partir d'un questionnaire auprès de 1958 adultes, Aldred (2015) a exploré leur attitude vis-à-vis dix types d'infrastructures cyclables, dont l'une impliquait des mesures de perméabilité filtrée à Londres. Concrètement, il s'agissait d'une rue résidentielle où la circulation de transit est éliminée à l'aide d'un obstacle bloquant l'accès aux automobiles tout en laissant passer les cyclistes et où la limite de vitesse est de 20 mph (30 km/h). Parmi les autres types d'infrastructures cyclables, il y avait par exemple une route achalandée, une bande cyclable, une piste cyclable séparée sur une route et une piste multifonctionnelle dans un parc. Les répondants ont également évalué ces dix infrastructures cyclables en fonction de cinq situations (seul, portant un enfant, avec un enfant de 8 ans, laisser un enfant de 12 ans et pour la majorité des personnes). L'infrastructure cyclable impliquant de la perméabilité filtrée est celle qui a obtenu le meilleur pointage moyen tout en étant la situation la plus appréciée dans 3 des 5 scénarios (seul, en portant un enfant et pour la majorité des gens). Ces résultats suggèrent que les mesures de perméabilité filtrée ciblées dans l'article (obstacle physique et mesure d'apaisement de la circulation) permettent de créer un environnement parmi les plus appréciés par les cyclistes, et ce, pour différents types de situations.

Troisièmement, P. Schepers et al. (2017) ont démontré que l'implantation de mesures de perméabilité filtrée dans les dernières décennies a permis aux Pays-Bas d'atteindre la plus haute part modale d'utilisation du vélo au monde, soit 26% de tous les déplacements (J. Pucher et Buehler 2008). De plus, le nombre de cyclistes tués par milliard de kilomètres parcourus a été réduit de 80% (P. Schepers et al. 2017). Les auteurs ont indiqué que parmi les facteurs ayant permis ces améliorations, la mise en place de larges zones sécuritaires où la circulation de transit a été exclue constitue l'un d'eux. Des pistes cyclables séparées et des traitements aux intersections ont aussi aidé à réduire la probabilité d'accidents entre les cyclistes, les piétons et les véhicules motorisés.

Quatrièmement, L. Frank et Hawkins (2008) ont analysé les comportements de mobilité des résidents de trois villes dans la région métropolitaine de Seattle. Au préalable, ils ont proposé une typologie des quartiers de ces trois villes en fonction des différences de connectivité entre leur réseau piéton et automobile. Ils identifient ainsi quatre types de quartiers :

1. Haute connectivité pour les piétons, faible connectivité pour l'automobile (perméabilité filtrée);
2. Faible connectivité pour les piétons, haute connectivité pour l'automobile;
3. Haute connectivité pour tous les modes (réseau en forme de grille); et

4. Faible connectivité pour tous les modes (banlieue).

Dans le cas de la première catégorie, soit celle avec un haut niveau de perméabilité filtrée, le réseau est qualifié de *fused grid* (voir figure suivante). Il s'agit d'un réseau à mi-chemin entre la grille traditionnelle et celui propre aux banlieues qui est plus sinueux.

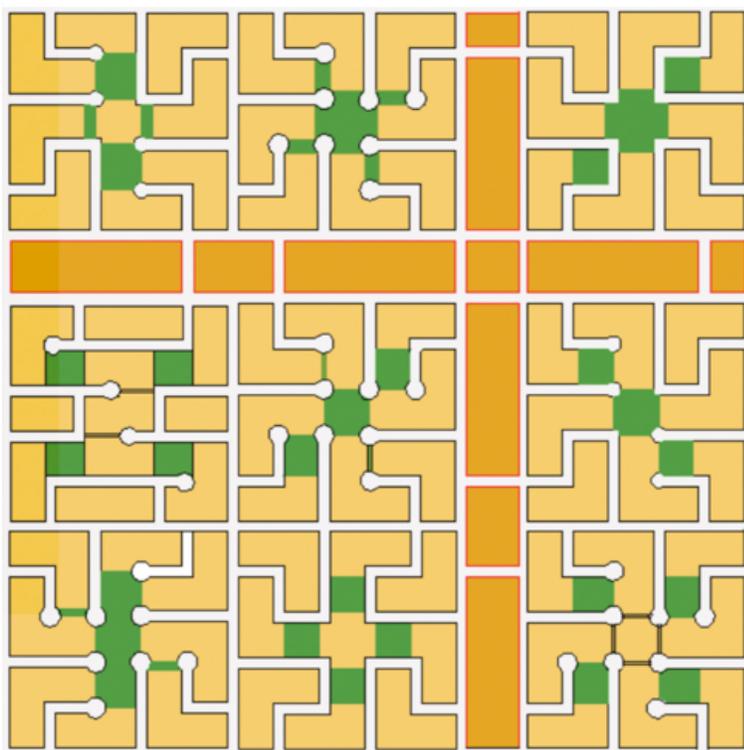


Figure 9. Exemple de réseau qualifié de *fused grid*

Source : L. Frank et Hawkins (2008, figure 3).

Dans un réseau de type *fused grid*, seules les routes principales sont sous forme de grille ce qui a pour effet de créer des zones dans chaque cellule de la grille. Le réseau se situant dans ces zones comporte des culs-de-sac et des routes sinueuses. Par contre, ces culs-de-sac et routes sinueuses sont ouverts aux piétons et aux cyclistes étant donné qu'ils sont tous reliés à au moins une autre route par un espace vert ou une voie de circulation pour le transport actif. Ainsi, le réseau est considérablement plus perméable pour les piétons et cyclistes.

Bien que les résultats portent sur la marche et non le vélo, ils sont malgré tout d'un grand intérêt puisqu'ils démontrent bien l'influence que peut avoir l'environnement urbain sur l'utilisation de l'automobile et du transport actif. Ces résultats indiquent que dans les quartiers sous forme de *fused grid*, le niveau d'utilisation de la marche est 43% plus important que dans une banlieue

conventionnelle (catégorie 4) ainsi que 32% plus important que dans un réseau sous forme de grille (catégorie 3) (L. Frank et Hawkins 2008).

Cinquièmement, il y a le cas de l'arrondissement de Hackney, à Londres. Au travers d'une campagne intitulée *Active by design* qui s'est échelonnée sur une décennie (Design Council 2014), l'arrondissement de Hackney a atteint le plus haut niveau de pratique du vélo de Londres avec 15,4% des déplacements effectués à vélo contre 12,8% en automobile (Stops 2014). Parmi les utilisateurs de vélo, 37% d'entre eux sont des femmes, ce qui représente le plus grand ratio de tous les arrondissements de Londres (Stops 2014). Ainsi, l'arrondissement de Hackney a au fil des années obtenu la réputation d'être la « capitale du vélo » de Londres, et ce, malgré la faible présence de pistes cyclables conventionnelles sur son territoire (Lam 2018). En effet, son succès réside surtout dans des mesures de perméabilité filtrée. Parmi ces mesures, notons la mise en place de routes en sites propres pour le transport actif, de plusieurs obstacles physiques et de route à sens unique pour limiter la circulation automobile ainsi que des mesures d'apaisement de la circulation (réduction de la vitesse permise, restriction dans le stationnement, meilleur marquage au sol et signalisation) (Assembly 2012).

1.5 Problématique

1.5.1 Problème de recherche

Il a été démontré que les villes font aujourd'hui face à de grands enjeux de durabilité et qu'elles sont activement à la recherche de solutions pour aménager leurs territoires de manière plus durable (Ahvenniemi et al. 2017). Parmi les actions déployées, la gestion du transport en est une de premier plan puisque de grands gains tant environnementaux, sociaux, qu'économiques peuvent y être acquis (Holden, Gilpin et Banister 2019). Ces gains potentiels touchent notamment à une diminution de l'énorme consommation d'énergies et de ressources nécessaires pour soutenir la mobilité en zone urbaine (Zawieska et Pieriegud 2018 ; Gilbert et Perl 2010). Ils s'incarnent également dans une réduction des hauts niveaux de pollution, d'accidents et de congestion causés par le transport motorisé (Gössling 2016 ; Stanley, Hensher et Loader 2011).

En effet, la revue de littérature a mis en lumière que l'utilisation des systèmes de transport n'est pas durable dans la majorité des villes, nécessitant des changements majeurs dans les politiques et pratiques (Arsenio, Martens et Di Ciommo 2016 ; Black 2010 ; Schwanen, Banister et Anable

2011). Un retour dans l'histoire a également permis de constater que l'arrivée de l'automobile vers 1920 en est une cause importante, et ce, puisqu'elle a engendré de profondes modifications dans la façon qu'ont eue plusieurs villes de se développer. Ces villes se sont étalées et leurs structures spatiales se sont basées sur l'automobile, engendrant ainsi un recours massif à ce mode pour se déplacer. Puis, au début des années 1990, l'approche de mobilité durable a émergé puisqu'il y a eu une prise de conscience des importants effets négatifs causés par le transport motorisé (Holden, Gilpin et Banister 2019). Depuis, les initiatives visant à tendre vers une mobilité urbaine plus durable se multiplient, plusieurs d'entre elles ayant comme objectif de favoriser un transfert modal de l'automobile vers le vélo (Babalik-Sutcliffe 2013).

Parmi ces initiatives, la perméabilité filtrée a été présentée comme un principe particulièrement efficace permettant d'atteindre cet objectif en stimulant la pratique du vélo au détriment de celle de l'automobile. Pour ce faire, ce principe énonce que le réseau de transport doit offrir une plus grande liberté de mouvement aux cyclistes qu'aux automobilistes (Melia 2008). Pour ce faire, le réseau accessible à vélo doit être plus dense, mieux configuré et mieux connecté que le réseau pour l'automobile. Selon Melia (2015), il s'agit d'un des facteurs expliquant les hautes parts modales de vélo que l'on retrouve en Europe. Toutefois, la perméabilité filtrée reste un concept très peu étudié. La figure suivante présente la relation entre les principaux thèmes mobilisés par la recherche et qui ont fait l'objet d'une revue de littérature depuis le début du chapitre.

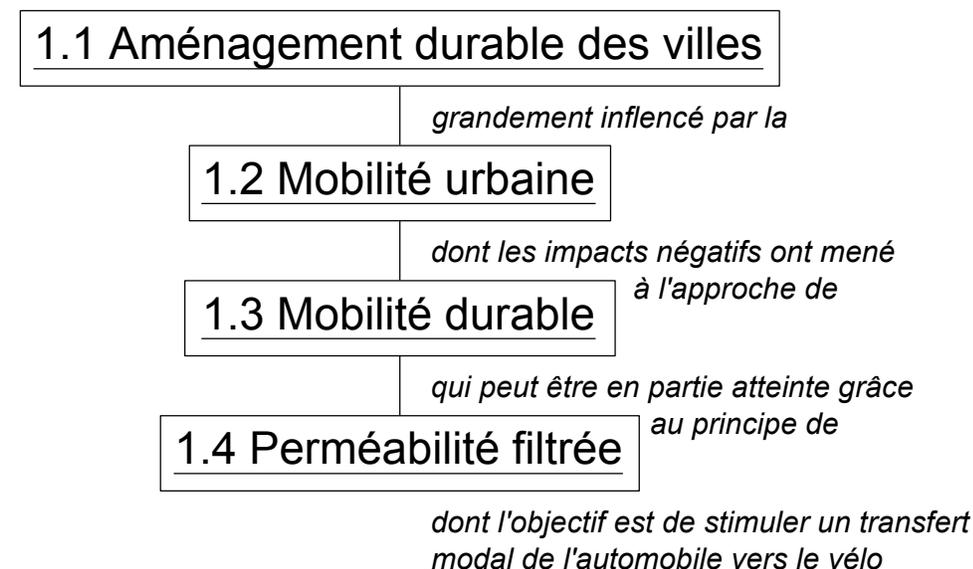


Figure 10. Schéma de la revue de littérature

1.5.2 Objectifs

Le concept de perméabilité filtrée demeure très peu connu et mobilisé dans le domaine de la planification des transports et urbaine, et ce, bien qu'il ait été démontré qu'il favorise la pratique du vélo et permet ainsi l'atteinte d'objectifs de mobilité durable. De plus, bien que les facteurs le favorisant soient connus, aucune étude n'a à ce jour proposé de l'opérationnaliser. Pourtant, tel que le précise Boulanger (2004), la traduction d'un concept en une mesure est une étape essentielle à l'avancement des connaissances. En effet, l'opérationnalisation d'un concept permet de soumettre des hypothèses scientifiques à une vérification empirique.

Le mémoire comporte deux principaux objectifs. Le premier est de mettre en lumière le concept de perméabilité filtrée comme approche efficiente de planification durable des transports. Le second objectif consiste à construire une première mesure permettant de quantifier le niveau de perméabilité filtrée sur un territoire pour combler l'absence d'opérationnalisation de ce concept. Ensuite, cette mesure sera utilisée pour tester les différentes observations émises dans la revue de littérature en lien avec la perméabilité filtrée, celles-ci n'ayant donc pas encore pu être confirmées ou infirmées. D'une part, ces observations se rapportent principalement à une évaluation du niveau de perméabilité filtrée au sein de villes. D'autre part, des comparaisons ont été avancées entre ce niveau en Europe et dans le reste du monde. Il importe donc de vérifier à l'aide d'un échantillon de villes suffisamment grand et varié la façon par laquelle la perméabilité filtrée varie à travers le monde. Pour ce faire, soixante villes ont été regroupées en cinq régions géographiques, soit l'Amérique centrale et du Sud, l'Amérique du Nord, l'Asie, l'Europe et l'Océanie. Il s'agira finalement de vérifier si l'on observe des différences significatives entre les villes de ces régions du monde. La contribution visée du mémoire est donc à la fois théorique et méthodologique.

1.5.3 Question et hypothèses

La question de recherche est la suivante : **Comment varie le niveau de perméabilité filtrée au sein de plusieurs villes à travers le monde?**

L'hypothèse principale est que le niveau de perméabilité filtrée est plus élevé dans les villes européennes qu'ailleurs dans le monde. De plus, nous nous attendons à ce que le niveau soit

légèrement plus élevé en Asie comparativement à l'Amérique du Nord et à l'Océanie, où les valeurs seraient plus faibles.

Ces hypothèses se basent sur le travail de Melia (2015) qui indique que le niveau de perméabilité filtrée est élevé dans plusieurs villes européennes. À l'inverse, le niveau de perméabilité filtrée serait particulièrement faible en Amérique du Nord puisque les villes canadiennes et états-uniennes ont habituellement une structure spatiale basée sur l'automobile. En effet, plusieurs villes nord-américaines ont été construites lors de l'arrivée de l'automobile dans les années 1920. Nous nous attendons également à ce que le niveau de perméabilité filtrée soit semblable en Océanie puisqu'on y retrouve une dynamique similaire dans le développement de plusieurs de ses villes (Rodrigue 2016). À l'inverse, l'arrivée de l'automobile a bien moins influencé le développement des villes chinoises et japonaises comme leurs urbanisations ont eu lieu bien plus tôt (Rodrigue 2016). De plus, la plus faible quantité d'espaces disponibles dans ces villes n'a potentiellement pas permis un étalement marqué et basé sur l'automobile. Ces particularités pourraient faire en sorte que l'Asie se caractérise par un plus haut niveau de perméabilité filtrée comparativement aux villes nord-américaines.

CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE

Ce deuxième chapitre a pour but de détailler la méthodologie employée pour étudier la variation du niveau de perméabilité filtrée dans plusieurs villes à travers le monde. La sélection des villes y sera d'abord présentée, suivie des critères importants à considérer lors de l'opérationnalisation d'un concept. Ensuite, une recension des dimensions et des indicateurs de perméabilité sera effectuée, ce qui mènera au développement de l'indice de perméabilité filtrée et à son calcul pour chaque ville. Finalement, la gestion des valeurs aberrantes tout comme les données et outils utilisés seront présentés.

2.1 Sélection des villes à l'étude

Soixante villes à travers le monde ont été sélectionnées sur la base de quatre critères (tableau 5). Premièrement, six villes européennes identifiées comme comportant un haut niveau de perméabilité filtrée par Melia (2015) et Foletta (2011) ont été retenues : Fribourg, Groningue, Houten, Malmö, Maastricht et Munster.

Deuxièmement, ce nombre étant plutôt limité, nous avons ajouté les 20 villes du classement 2019 du *Copenhagenize Index* (Copenhagenize Design Company 2019), identifiant ainsi les villes les plus favorables à la pratique du vélo dans le monde. On pourrait alors supposer que le niveau de perméabilité filtrée y est relativement élevé. Ce classement analyse la place du vélo dans plus de 600 villes en s'appuyant sur plusieurs indicateurs de nature tant quantitative (part modale du vélo, écart entre la proportion d'hommes et de femmes cyclistes, etc.) que qualitative (influence des groupes de promotion du vélo, prise en compte du vélo dans l'aménagement urbain, etc.).

Troisièmement, les villes nord-américaines étant reconnues comme ayant un faible niveau de perméabilité filtrée comparativement aux villes européennes (Melia 2012), les villes centres de 15 régions métropolitaines nord-américaines ont été retenues (7 canadiennes, 8 étatsuniennes), soit celles avec les plus hautes parts modales de vélo pour se rendre au travail en 2011 (CMM 2017). Parmi ces 15 villes, signalons que Montréal et Vancouver font aussi partie du *Copenhagenize Index* de 2019.

Quatrièmement, pour étendre la sélection géographique par continent, 21 villes ont été ajoutées : la Ville de Mexico pour la région de l'Amérique du Nord et des villes parmi les plus importantes

en Amérique centrale et en Amérique du Sud (n=7), en Asie (n=8) et en Océanie (n=5). Aucune ville n'a par contre été retenue en Afrique puisque selon Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball (2017), les données d'*OpenStreetMap* (OSM), soit celles utilisées dans le cadre de cette recherche, y sont très incomplètes. De plus, aucune ville russe n'a pu être sélectionnée en raison d'une différence importante dans le calcul des trajets à vélo, ce qui aurait faussé la comparaison avec les autres villes. En effet, seuls les cyclistes peuvent y emprunter les routes étiquetées comme *service*, alors que dans les autres villes, ces segments sont accessibles ou non accessibles à la fois par les automobilistes et les cyclistes; l'accessibilité pour les cyclistes est ainsi largement surestimée en Russie.

Tableau 5. Villes sélectionnées par région géographique et selon les quatre critères de sélection (population entre parenthèses)

Amérique centrale et du Sud (n=8)	Amérique du Nord (n=16)		Asie (n=10)	Europe (n=21)		Océanie (n=5)
Bogota ^b (7 302 020)	Boston ^c (864 153)	Sacramento ^c (589 070)	Beijing ^d (20 445 672)	Amsterdam ^b (820 085)	Houten ^a (49 908)	Auckland ^d (1 685 306)
Buenos Aires ^d (3 153 789)	Calgary ^c (1 319 303)	San Francisco ^c (1 015 133)	Erevan ^d (1 094 755)	Anvers ^b (477 582)	Ljubljana ^b (295 910)	Brisbane ^d (1 215 471)
La Havane ^d (1 685 595)	Denver ^c (787 832)	Seattle ^c (869 346)	Hong Kong ^d (7 245 647)	Barcelone ^b (1 377 959)	Maastricht ^a (124 074)	Christchurch ^d (383 895)
Lima ^d (9 184 642)	Edmonton ^c (992 985)	Toronto ^c (2 905 885)	Jérusalem ^d (1 198 479)	Berlin ^b (3 429 725)	Malmö ^a (320 109)	Melbourne ^d (4 731 843)
Quito ^d (2 653 698)	Los Angeles ^c (3 914 318)	Vancouver ^{b,c} (674 307)	Kyoto ^d (2 590 489)	Bordeaux ^b (174 024)	Münster ^a (286 403)	Sydney ^d (4 760 150)
Rio de Janeiro ^d (6 655 654)	Mexico ^d (9 084 056)		Manille ^d (1 879 368)	Brême ^b (537 675)	Oslo ^b (689 464)	
Santiago ^d (6 354 100)	Montréal ^{b,c} (1 806 894)		Séoul ^d (9 877 221)	Copenhague ^b (619 475)	Paris ^b (2 155 747)	
São Paulo ^d (12 249 618)	Ottawa ^c (993 979)		Shanghai ^d (23 999 047)	Freiburg ^a (224 716)	Strasbourg ^b (179 647)	
	Phoenix ^c (1 779 563)		Taipei ^b (2 683 357)	Groningen ^a (196 572)	Utrecht ^b (330 944)	
	Portland ^c (724 306)		Tokyo ^b (12 904 450)	Hambourg ^b (1 764 847)	Vienne ^b (1 892 206)	
	Québec ^c (565 972)			Helsinki ^b (648 179)		

Population selon LandScan 2019. ^a Villes avec haut niveau de perméabilité filtrée ; ^b Top 20 du classement Copenhagenize ; ^c Villes nord-américaines ; ^d Villes pour augmenter l'étendue géographique.

2.2 Critères à considérer lors de l'opérationnalisation d'un concept

Comme l'objectif principal du mémoire est d'opérationnaliser le concept de perméabilité filtrée, les éléments importants à considérer lors de l'opérationnalisation d'un concept ont été recensés. Quatre critères ont été définis à partir du travail de Geurs et Van Wee (2004).

Le premier critère indique que la mesure créée doit avoir une base théorique forte, ce qui implique qu'elle doit être sensible à des variations au niveau de l'ensemble des dimensions du concept à

opérationnaliser. C'est pourquoi Gudmundsson (2001) propose d'utiliser une combinaison d'indicateurs, et ce, pour capturer chacune des dimensions du concept. De cette manière, la mesure est robuste en adhérant fortement à la théorie. C'est que l'on peut nommer un indice ou un macro-indicateur, soit l'agrégation de plusieurs indicateurs pour former une seule mesure (Boulanger 2004). Le terme indice sera utilisé dans la suite du mémoire. La figure suivante en schématise la création.

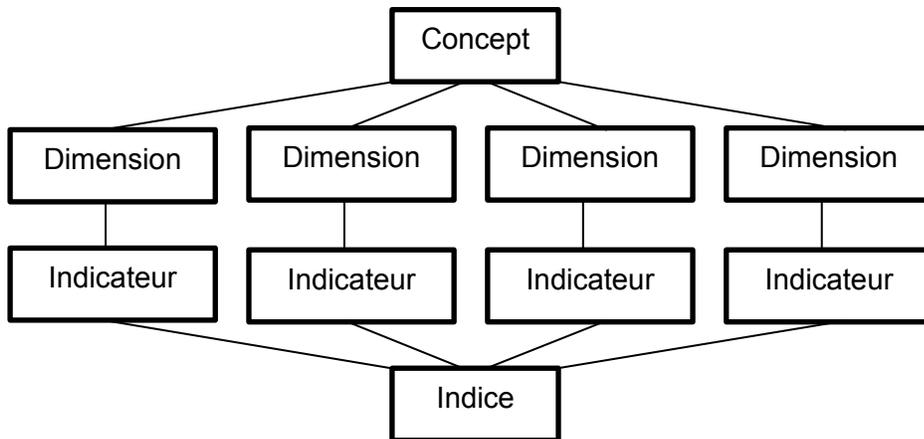


Figure 11. Exemple schéma de création d'un indice

Ainsi, les dimensions du concept de perméabilité filtrée devront être définies tout comme des indicateurs pour caractériser chacune d'elles. Il s'agit du sujet de la section 2.3 (*Recension des dimensions et indicateurs de perméabilité*).

Comme deuxième critère, il y a la facilité avec laquelle l'indice est calculé (Morris, Dumble et Wigan 1979). Il s'agit ici d'évaluer les besoins en ressources, par exemple en matière de données, temps, budget, logiciels et compétences. Plus un indice est facile à mettre en place, plus il a de chance d'être employé. Par contre, ce critère est souvent en conflit avec le premier puisque bien souvent, plus un indice intègre de théorie, plus il est demandant à calculer. Ainsi, l'indice de perméabilité filtrée devra idéalement faire appel à des indicateurs simples à calculer et à des données et outils accessibles à tous.

Comme troisième, il y a la communication et l'interprétation qui énonce qu'un bon indice doit être facile à interpréter et à expliquer (Morris, Dumble et Wigan 1979). Ce critère tend à influencer sa fréquence d'utilisation et donc son utilité. En effet, un indice facilement compréhensible sera bien souvent préférable à une mesure théorique exigeant de longues explications. Tel que souligné par Bertolini, Le Clercq et Kapoen (2005, 218), il est nécessaire de trouver « le bon équilibre entre une mesure ayant un fondement théorique et empirique solide et une mesure qui est assez simple

pour être employée dans les processus d'aménagement interactifs et créatifs où les participants ont habituellement différents niveaux et champs d'expertise [traduction libre]. » Ainsi, l'indice de perméabilité filtrée devra être développé de façon à être interprétable le plus facilement possible.

Le quatrième critère se rapporte à la pertinence de l'indice pour des analyses économiques et sociales. Comme il ne s'agit pas d'un objectif visé par la recherche, ce critère n'a pas été appliqué.

2.3 Recension des dimensions et indicateurs

Tel que l'indique le premier critère venant d'être présenté, il est essentiel de définir ses dimensions pour développer un bon indice de perméabilité filtrée. Ensuite, des indicateurs doivent être sélectionnés pour les caractériser. Comme présenté à la section 1.4.1 (*Perméabilité et connectivité*), il s'agit de la configuration, la connectivité et la densité.

Une revue de littérature a permis de cibler 15 indicateurs de perméabilité. Plusieurs d'entre eux ont été adaptés et modifiés, mais dans la grande majorité des cas, le principe sous-jacent reste le même. Ainsi, les indicateurs qui seront présentés illustrent de manière exhaustive les différentes mécaniques utilisées pour quantifier la perméabilité d'un réseau de transport. L'étape suivante est de les classer en fonction de la dimension qu'ils permettent de mesurer. En ce sens, il est important de noter que ces indicateurs sont en grande majorité utilisés pour mesurer la connectivité d'un réseau de transport. Par contre, comme avancés par W. E. Marshall et Garrick (2010), certains de ces indicateurs dits de connectivité ne permettent pas réellement de capter la connectivité d'un réseau, mais plutôt l'une des deux autres dimensions de la perméabilité. Tel que rapporté à la section 1.4.1 (*Perméabilité et connectivité*), ceci peut s'expliquer par une certaine confusion entourant les termes *perméabilité* et *connectivité* qui sont souvent utilisés pour faire référence à la même notion.

Dans le tableau suivant, les 15 indicateurs de perméabilité sont brièvement décrits et classés en fonction de la dimension dont il est jugé qu'ils permettent de mesurer. Une description plus approfondie de chaque indicateur est présentée par la suite.

Tableau 6. Classification des indicateurs de perméabilité selon la dimension mesurée

Dimension	Indicateur	Description
Configuration	Taille des îlots	Caractérisation de la forme des îlots dans une zone d'étude (aire, longueur, largeur, diagonale, etc.).
	Type de réseau	Indication sur le type et la configuration des intersections ou des segments d'un réseau (nombre cul-de-sac, nombre intersection à trois voies, nombre de ponts, nombre de boucles, etc.).
	<i>Closeness centrality</i>	Calcul de proximité entre les nœuds : $C(x) = n / \sum_y d(x, y)$ n représente le nombre total de nœuds et $d(x, y)$ la distance entre les nœuds x et y .
	<i>Betweenness centrality</i>	Caractérise l'importance des nœuds : $B(v) = \sum \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$ σ_{st} représente le nombre de trajets les plus courts entre tous les nœuds du réseau et $\sigma_{st}(v)$ est le nombre de ces trajets passant par le nœud v
	<i>Directional reach</i>	Somme de la longueur de réseau accessible à partir d'un point et pour une distance de parcours donnée et/ou pour un nombre de changements de direction donné.
Connectivité	Isochrone	Aire accessible à partir d'un point et pour une distance de parcours donnée.
	Ratio de nœud connecté	$n / (n + d)$; n représente le nombre d'intersections et d est le nombre de culs-de-sac.
	Ratio lien-nœud	Caractérise la complexité d'un réseau e / v ; e représente le nombre de liens et v le nombre de nœuds.
	<i>Pedestrian route directness</i>	Ratio entre la distance réticulaire et la distance euclidienne entre deux points.
	Indice gamma	Caractérise le degré de connectivité par rapport au nombre maximal théorique de liens $e / 3(v - 2)$; e représente le nombre de liens et v le nombre de nœuds.
Densité	Indice alpha	Ratio entre le nombre de circuits dans un réseau et le nombre maximal de circuits qu'il pourrait comporter $(e - v + 1) / (2 * v - 5)$; e représente le nombre de liens et v le nombre de nœuds.
	Densité d'intersection	Nombre d'intersections dans la zone d'étude / aire zone d'étude
	Densité du réseau	Longueur réseau dans la zone d'étude / aire zone d'étude.
	Densité des îlots	Nombre d'îlots dans la zone d'étude / aire zone d'étude.
	<i>Metric reach</i>	Longueur totale de réseau accessible à partir d'un point et pour une distance de parcours donnée.

Inspiré entre autres de Berrigan, Pickle et Dill (2010), Dill (2004) et Ellis et al. (2016).

2.3.1 Configuration – présentation des indicateurs

Le premier indicateur de configuration est celui de la taille des îlots. Il implique de caractériser la forme des îlots présents dans une zone d'étude. Il peut s'agir de l'aire, du périmètre, de la longueur, de la largeur ou de la diagonale des îlots. Ainsi, toutes les caractéristiques géométriques peuvent être utilisées et elles sont souvent présentées sous forme de moyenne ou de médiane. Pour décrire le réseau de 50 communautés de San Francisco, Cervero et Kockelman (1997) ont par exemple mesuré la longueur moyenne des îlots. Elle a été évaluée en moyenne à 579 pieds (176 mètres). Certaines communautés ont adopté des valeurs maximales de longueur des îlots pour les nouveaux quartiers (S. Handy, Paterson et Butler 2003). Elles se situent habituellement entre 300 pieds (91 mètres) et 600 pieds (182 mètres). Des longueurs de 330 pieds (100 mètres) sont recommandées pour faciliter les déplacements à la marche et en vélo. Des normes ont aussi été adoptées pour l'aire des îlots. Par exemple, la ville de Fort Collins, au Colorado, a spécifié une valeur maximale de 12 acres (environ 0,05 km²) (Dill 2004). Ces normes ont été mises en place pour réduire la taille des îlots et ainsi maximiser le nombre d'intersections. De cette façon, les trajets à parcourir sont potentiellement plus courts et diversifiés, et ce, dans le but de privilégier les modes actifs.

Le deuxième indicateur de configuration est celui du type de réseau. Cet indicateur vise à caractériser le type et la configuration des éléments d'un réseau. Tout d'abord, l'objet d'étude peut être les intersections. La quantité tout comme le pourcentage de cul-de-sac, d'intersections en *T* (3 voies) ou à 4 voies peuvent être calculés. La fraction du nombre d'intersections à 4 voies sert surtout à définir si le réseau est sous forme de grille ou non. Par exemple, Boarnet et Sarmiento (1998) ont calculé le pourcentage d'intersections à 4 voies dans un rayon d'un quart de mile (0,40 km) autour de la résidence d'une personne. Les auteurs ont choisi cet indicateur puisqu'il reflète bien si le réseau est de style néo-traditionnel. Il est à mentionner que ce type de réseau est apprécié pour sa forte connectivité.

Ensuite, les segments d'un réseau peuvent être caractérisés pour savoir s'il s'agit de ponts, d'un cul-de-sac, de boucles ou comme faisant partie d'un cycle (C. Barrington-Leigh et Millard-Ball 2020). Un pont représente un lien reliant deux secteurs non connectés autrement. Un cul-de-sac est un lien dont l'un des nœuds n'est pas relié à un autre lien. Une boucle qualifie un lien rejoignant le même nœud. Finalement, tous les segments n'appartenant pas à une de ces trois catégories vont dans la quatrième catégorie. Une fois les liens d'un réseau caractérisés, des ratios sont habituellement calculés. Par exemple, il y a le ratio entre la somme du nombre de lien de type

pont, cul-de-sac et boucle et le nombre total de liens. Il est appelé *treeness* par Parthasarathi, Hochmair et Levinson (2015). Plus il est élevé, moins le réseau est considéré comme connecté. Finalement, l'ensemble d'un réseau peut être analysé et classifié dans une catégorie. C'est ce qu'ont fait C. Barrington-Leigh et Millard-Ball (2020) qui ont découpé le réseau routier mondial dans des cellules d'environ 1 km², pour ensuite classer le réseau de ces cellules dans l'une de huit catégories représentant des configurations différentes. Ces catégories sont les suivantes : grille, degré nodale 3, grille irrégulière, grille cassée, détournée, cul-de-sac, dendritique et déconnectée. Les résultats indiquent, par exemple, que la proportion de réseau sous forme de grille a diminué de 6% en 1975 à 3% dans la période de 2000-2014.

Le troisième indicateur de configuration est le *closeness centrality*. Il s'agit d'un calcul de proximité entre les nœuds d'un réseau à l'étude. Cet indicateur se calcule avec l'équation suivante, et ce, pour tous les nœuds :

$$C(x) = \frac{n}{\sum_y d(x, y)}$$

n représente le nombre total de nœuds et $d(x, y)$ la distance entre les nœuds x et y . Plus la valeur de *closeness centrality* d'un nœud est élevée, plus le nœud est central dans le réseau. Il permet donc de savoir où se situent les nœuds les plus centraux et donc accessibles d'un réseau. Cet indicateur peut servir à mesurer les différences apportées par la modification d'un réseau. C'est ce qu'ont fait Sun, Webster et Chiaradia (2018) en simulant l'ouverture de *gated communities* à Nanchang en Chine uniquement aux piétons et cyclistes. De cette façon, les portions de la ville qui deviendraient les plus accessibles par ces modes ont été identifiées.

Le quatrième indicateur de configuration est le *betweenness centrality*. Également utilisé dans l'article de Sun, Webster et Chiaradia (2018), il permet de savoir combien de fois un nœud est utilisé dans l'itinéraire le plus court entre tous les autres nœuds du même réseau. Son équation est la suivante :

$$B(v) = \sum \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

σ_{st} représente le nombre de trajets les plus courts entre tous les nœuds du réseau, et $\sigma_{st}(v)$ est le nombre de ces trajets passant par le nœud v . Ainsi, plus l'indicateur de *betweenness centrality* d'un nœud est élevé, plus celui-ci a le potentiel d'être utilisé. Ceci peut permettre par exemple de localiser les nœuds les plus importants d'un réseau pour ensuite travailler à assurer sa résilience.

Le cinquième indicateur de configuration est le *directional reach* qui peut être calculé de deux façons. Tout d'abord, il peut s'agir de mesurer la longueur totale de réseau accessible à partir du centre de tous les tronçons du réseau à l'étude, et ce, jusqu'à avoir effectué un certain nombre de changements de direction exprimé sous forme d'un angle. Ozbil, Peponis et Stone (2011) ont par exemple caractérisé le réseau de trois zones à Atlanta avec deux changements de direction de 10° et plus. Les résultats démontrent que le *directional reach* est de 30,6 miles (49,3 km) pour un réseau sous forme de grille et de 9,6 miles (15,5 km) ou 8,3 miles (13,4 km) pour les deux autres réseaux plus sinueux. L'autre façon de mesurer le *directional reach* est d'imposer une distance à parcourir en plus d'un nombre de changements de direction. Ellis et al. (2016) ont calculé le *directional reach* pour une distance de 500 et 1000 mètres et deux changements de direction de 20° et plus autour de la résidence de participants à Belfast en Irlande. Pour Peponis, Bafna et Zhang (2008), un réseau ne doit pas uniquement être caractérisé en termes de distance, mais doit aussi prendre en compte la façon qu'un utilisateur interprète l'espace. L'ajout d'un nombre de changements de direction permet cette interprétation de l'espace. De cette façon, le *directional reach* est sensible à la forme et à l'alignement du réseau et non pas juste sa densité.

Le sixième et dernier indicateur de configuration est celui de l'isochrone. Il s'agit de l'aire pouvant être atteinte à partir d'un point d'origine et pour un temps ou une distance de parcours donné. Tal et Handy (2012) ont par exemple mesuré l'isochrone autour d'écoles et de commerces pour une distance de marche de 5 minutes (537 mètres soit 1/3 mile) dans la ville de Davis en Californie. Pour Dill (2004), l'indicateur peut aussi se calculer en fonction du nombre de lot accessible et non d'aire. Lorsqu'il s'agit d'une distance de parcours donnée, la superficie accessible peut également être divisée par l'aire d'un cercle de rayon de cette distance. De cette façon, l'indicateur varie entre 0 et 1. Dans tous les cas, plus la valeur de l'indicateur est élevée, plus le réseau est bien configuré puisqu'il permet d'atteindre une plus grande zone.

2.3.2 Connectivité – présentation des indicateurs

Le premier indicateur de connectivité est le ratio de nœuds connectés. Il s'agit du nombre d'intersections dans la zone d'étude divisé par le nombre d'intersections plus le nombre de cul-de-sac. La valeur maximale est de 1 et indique qu'il n'y a pas de cul-de-sac dans le réseau à l'étude. Le réseau est alors jugé bien connecté. Des valeurs de 0,7 ou supérieures sont habituellement recommandées (Dill 2004). Song (2005) a par exemple utilisé cet indicateur pour caractériser le réseau routier de cinq états américains entre 1900 et 1990. Dans quatre états, la

valeur de l'indicateur a diminué au fil des années, ce qui tend à indiquer que leurs réseaux sont devenus de moins en moins connectés.

Le deuxième indicateur de connectivité est le ratio lien-nœud. Comme son nom l'indique, il se mesure en divisant le nombre de liens d'un réseau par son nombre de nœuds. Une grille parfaite à un ratio de 2,5. Chin et al. (2008) ont par exemple utilisé des temps de parcours de 5, 10, 15 et 20 minutes autour d'écoles dans quatre quartiers à Perth en Australie pour le calcul de l'indicateur. Dans les quartiers de style traditionnel (majoritairement sous forme de grille), le ratio se situait entre 1,33 et 1,46, et entre 1,36 et 1,43 pour les quartiers plus récents. Ewing (2019) suggère qu'un ratio de 1,4 ou supérieur indique qu'un réseau est favorable aux piétons. Par contre, les principaux défauts de cet indicateur sont qu'il ne reflète pas la longueur des liens, qu'il n'est pas intuitif et ainsi difficile à interpréter (Dill 2004). Il ne s'agit donc pas d'un bon indicateur pour mesurer la connectivité du réseau de transport actif pour qui la distance est un facteur critique. En effet, le ratio lien-nœud est basé avant tout sur la planification automobile pour laquelle l'ajout d'intersections a le potentiel de réduire la charge sur les liens du réseau en augmentant le nombre de routes disponibles (Tal et Handy 2012).

Le troisième indicateur de connectivité est celui du *pedestrian route directness* (PRD). Il s'agit du ratio entre la distance réticulaire (sur le réseau) et la distance euclidienne (à vol d'oiseau) entre un point d'origine et de destination. Il varie théoriquement entre 1 et l'infini. Une valeur de 1 indique que les deux points ont une connexion parfaite : le trajet les reliant étant le plus court possible, soit en ligne droite. À l'inverse, plus l'indicateur est élevé, plus le trajet entre les deux points est sinueux et peu connecté. Par exemple, si la valeur du PRD est de 1,6, cela signifie que le trajet est 60% plus long que s'il avait été effectué en ligne droite. Cet indicateur n'est par contre pas révélateur de la connectivité d'un milieu, mais permet plutôt de mesurer à quel point il est possible de se rendre à un endroit directement (Stangl 2019). Malgré tout, s'il est calculé plusieurs fois dans une zone entre différents points, les résultats permettront cette fois-ci de capter le niveau de connectivité de la zone. Il s'agit de l'approche habituellement utilisée (Hess 1997 ; Stangl 2019 ; Randall et Baetz 2001). Le PRD semble avoir été utilisé pour la première fois par Hess (1997) pour analyser la connectivité du réseau piéton d'une banlieue et d'une zone centrale de Seattle d'environ 3 km² chacune. Des points sur le réseau ont été sélectionnés à 1/8, 1/4, 3/8 et 1/2 mile du centroïde des zones et le PRD a été mesuré entre ces points et le centroïde. Le PRD était en moyenne de 1,2 dans la zone centrale et de 1,7 dans la banlieue. Randall et Baetz (2001) se sont également servis du PRD pour développer un outil proposant des améliorations au réseau piéton du quartier de Berrisfield, situé à Hamilton, en Ontario. Le PRD a été mesuré entre toutes les

maisons et les écoles d'une zone d'environ 500 par 1500 mètres. Ensuite, grâce à l'outil, des modifications au réseau ont été proposées pour permettre au plus grand nombre de ménages d'être à moins de 400 mètres d'une école, tout en maintenant un PRD de moins de 1,5. Au-delà de ces deux critères, il a été supposé que la marche ne serait pas utilisée puisque le trajet serait perçu comme trop long ou sinueux. En ce sens, le PRD a comme principal atout d'offrir une indication sur l'efficacité d'un réseau à offrir un trajet direct entre un point d'origine et de destination, et capture de cette façon un objectif clé en mobilité durable, soit de réduire les distances de parcours. En ce sens, plus un réseau offre des trajets directs, davantage ses utilisateurs auront de la facilité à s'y retrouver et auront tendance à l'emprunter à la marche ou en vélo. C'est la raison pour laquelle, selon Dill (2004), que le PRD est la meilleure mesure de connectivité pour promouvoir les modes actifs.

Les deux derniers indicateurs de connectivité proviennent du domaine de la géographie (Dill 2004). Il s'agit de l'index gamma et de l'index alpha. L'index gamma est le ratio entre le nombre de liens (l) dans un réseau et le nombre maximal de liens possibles entre les nœuds (n). Son équation est la suivante :

$$G = \frac{l}{3(n - 2)}$$

Cet indicateur varie entre 0 et 1. Il est souvent exprimé sous forme de pourcentage (Berrigan, Pickle et Dill 2010). S'il est de 0,38, ceci indique par exemple que 38% du réseau est connecté.

Le dernier indicateur de connectivité est l'index alpha. Cet indicateur utilise le concept de circuit, soit un chemin fini et fermé se terminant à un seul nœud (Dill 2004). L'index alpha est le ratio entre le nombre de circuits dans un réseau et le nombre maximal de circuits qu'il pourrait comporter. Son équation est la suivante :

$$A = \frac{l - n + 1}{2 * n - 5}$$

Tout comme pour l'index gamma, il varie de 0 à 1. Plus sa valeur est élevée, plus le réseau est considéré comme connecté.

2.3.3 Densité – présentation des indicateurs

Le premier indicateur de densité se rapporte à la densité d'intersections, soit le nombre d'intersections dans une zone divisée par l'aire de la zone. Plus la valeur est élevée, plus la densité du réseau est jugée importante. Tel que précisé par Stangl (2019), il s'agit de la méthode la plus souvent utilisée dans les recherches sur la marchabilité et, de manière plus générale, dans les analyses de perméabilité. Son principal avantage est son opérationnalisation simple et son faible besoin en données. Il y a deux façons de mesurer l'indicateur.

Premièrement, la quantité d'intersections dans une zone géographique précise peut être dénombrée. Par exemple, Cervero et Radisch (1995) ont calculé la densité d'intersections dans deux communautés de San Francisco. L'une comportait un réseau sinueux typique des banlieues avec une densité de 40 intersections au km² et la seconde communauté se caractérisait par un réseau sous forme de grille d'une densité de 79 intersections au km².

Deuxièmement, la densité d'intersections peut être mesurée dans une zone tampon autour d'un point. Il pourrait s'agir d'une zone tampon de deux kilomètres autour d'écoles comme Giles-Corti et al. (2011) ou d'une zone tampon de 500 mètres autour de tous les logements d'une zone d'étude (Berrigan, Pickle et Dill 2010). Cette deuxième technique est considérée comme plus fiable puisqu'elle génère moins de distorsions associée à la taille de la zone d'étude qui varie avec la première technique (Stangl et Guinn 2011). La comparaison des résultats entre différents territoires est ainsi facilitée.

Le deuxième indicateur de densité est celui de la densité du réseau. Il s'agit de la longueur totale de tous les tronçons du réseau divisée par l'aire de la zone d'étude. Plus sa valeur est élevée, plus la densité du réseau est importante. À titre d'exemple, Moudon et al. (1997) ont défini qu'un réseau en zone urbaine à une densité d'environ 19 km de route par km² et de 8 km de route par km² en zone suburbaine. Pour Pafka et Dovey (2017), cette méthode est seulement utile pour comparer des réseaux routiers avec des configurations similaires. De plus, pour Stangl (2011), il s'agit d'un indicateur pertinent pour l'exploration, mais moins pour la planification.

Le troisième indicateur est celui de la densité des îlots. Il se rapporte au nombre d'îlots dans une zone divisé par l'aire de cette zone. Plus sa valeur est élevée, plus la densité du réseau est importante. L. D. Frank, Stone Jr et Bachman (2000) affirment qu'il s'agit d'une bonne manière d'estimer la connectivité d'un réseau puisqu'un îlot est par définition délimité par des routes.

Le quatrième indicateur est celui du *metric reach* qui représente la somme de la longueur du réseau accessible à partir d'un point et pour une distance de parcours donnée. Encore une fois, plus sa valeur est élevée, plus la densité du réseau est importante. Peponis, Bafna et Zhang (2008) ont calculé cet indicateur à Atlanta à partir du centre de chaque tronçon de route pour une distance de parcours de 1 mile (1,61 km). Les résultats indiquent que la moyenne du *metric reach* est de 13,58 miles (21,85 km).

2.4 Indice de perméabilité filtrée

Dans le cadre de son opérationnalisation, la perméabilité filtrée est conçue comme le degré de différence entre la perméabilité du réseau accessible à vélo et la perméabilité du réseau accessible en automobile. Ainsi, l'indice créé vise à quantifier l'avantage (ou le désavantage) de liberté de mouvement qu'un réseau offre à un.e cycliste par rapport à celle d'un.e automobiliste.

2.4.1 Approche générale

L'approche générale retenue pour la construction de l'indice de perméabilité filtrée repose sur trois étapes et vise à quantifier le niveau de perméabilité filtrée autour d'un point. Tout d'abord, un indicateur de perméabilité doit être choisi pour chacune des trois dimensions. Il a été défini qu'un seul indicateur serait sélectionné par dimension afin de faciliter le calcul de l'indice et surtout pour réduire les temps de calcul. Ensuite, chaque indicateur est calculé à deux reprises autour du point, soit une première fois avec le réseau accessible à vélo et une seconde fois avec le réseau accessible en automobile. Ce faisant, la configuration, la connectivité et la densité de ces deux réseaux sont caractérisées. Finalement, pour chaque dimension, on calcule le ratio entre le résultat de l'indicateur obtenu à partir du réseau accessible à vélo et en automobile. Ces ratios permettent d'évaluer le degré de différence de perméabilité entre ces deux réseaux. Le détail de la formule de l'indice de perméabilité filtrée est présenté à la section 2.4.3 (*Formule*). Par contre, avant d'y arriver, les indicateurs retenus pour caractériser chaque dimension sont présentés dans la prochaine section.

2.4.2 Choix de l'unité

Les deux unités envisageables pour l'indice de perméabilité filtrée sont la distance et le temps. Comme le démontre le tableau 6, les principaux indicateurs utilisés pour caractériser la perméabilité d'un réseau de transport se basent en grande majorité sur la distance. Ceci est dû au fait que ces indicateurs visent à mesurer soit la connectivité, la configuration ou la densité d'un réseau, ces trois dimensions n'intégrant pas les conditions de circulation et donc un temps de parcours. Ainsi, le concept de perméabilité implique une analyse statique plutôt que dynamique d'un réseau. Autrement dit, l'analyse porte davantage sur les caractéristiques d'un réseau (opérationnalisée par une distance) plutôt que sur l'utilisation que l'on peut en faire (opérationnalisée par un temps de parcours). Nous considérons ainsi que la distance est une unité plus adaptée au concept de perméabilité filtrée.

De plus, le choix de la distance comme unité a l'avantage de permettre une comparaison plus précise entre le réseau accessible à vélo et en voiture. En effet, le temps de parcours est influencé par de nombreux facteurs tant environnementaux que personnels et varie selon le jour et le moment de la journée, et ce, surtout dans les villes avec des niveaux importants de congestion routière.

2.4.3 Indicateurs retenus

Pour la dimension de la configuration, l'isochrone représentant l'aire pouvant être atteinte à partir d'un point d'origine et pour une distance de parcours donnée a été retenue. L'isochrone a été sélectionnée puisqu'elle offre une indication sur un élément clé du principe de perméabilité filtrée, soit celui de la liberté de mouvement. Plus l'aire atteinte est élevée, plus le réseau offre une grande liberté de mouvement. Une distance de 5000 mètres a été utilisée pour le calcul de l'isochrone puisqu'il s'agit approximativement la distance moyenne des déplacements à vélo rapportée dans plusieurs villes (Damant-Sirois et El-Geneydy 2015 ; Dill 2009 ; Lawson et al. 2013 ; Winters et al. 2010). La figure suivante illustre en guise d'exemple une isochrone de 5000 mètres.

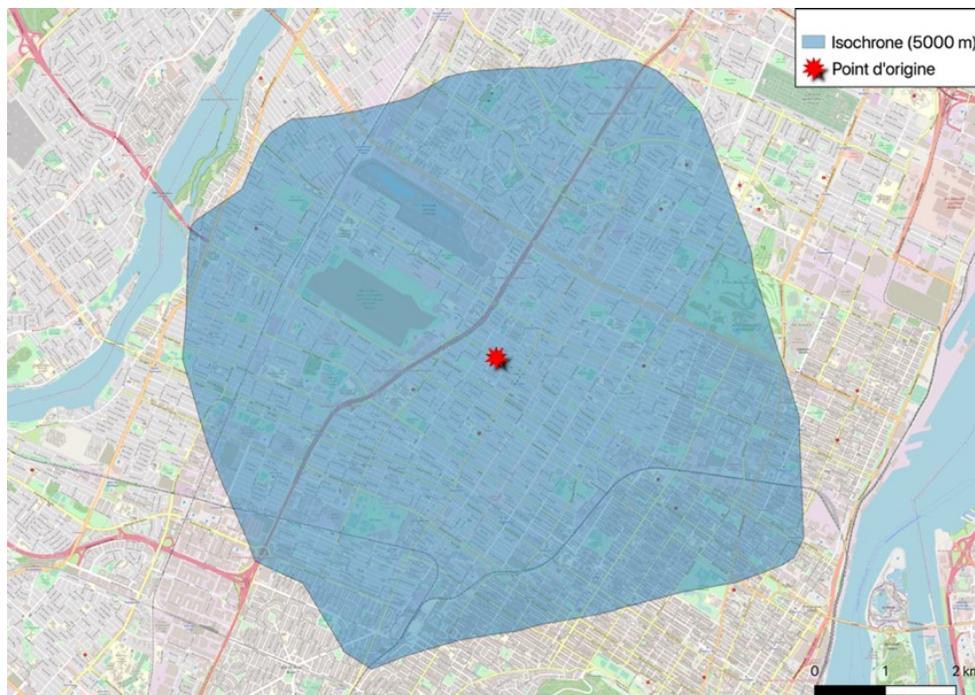


Figure 12. Exemple d'une isochrone de 5000 mètres

Source : Carte produite dans QGIS.

Pour la dimension de la connectivité, l'indicateur retenu est le *pedestrian route directness* (PRD) qui est le ratio entre les distances réticulaires et euclidiennes entre deux points (Hess 1997). Cet indicateur a été sélectionné puisqu'il permet d'évaluer un élément important du concept de perméabilité filtrée, soit celui que les trajets doivent être plus directs à vélo qu'en automobile. De plus, il est considéré comme la meilleure mesure de connectivité pour les modes actifs (Dill 2004).

Inspiré de Stangl (2019), le calcul du PRD est effectué à plusieurs reprises entre différentes paires de points à l'intérieur de l'isochrone de 5000 mètres. Tout comme pour chaque indicateur, il est calculé une fois avec le réseau accessible à vélo et une seconde fois avec le réseau accessible en automobile. Premièrement, des points sont positionnés le long du périmètre de l'isochrone à équidistance de deux kilomètres. Ce seuil a été retenu puisqu'il permet d'avoir habituellement entre 10 et 19 points, soit un nombre suffisant pour caractériser la connectivité du réseau sans allonger les temps de calcul. Deuxièmement, ces points sont projetés sur le segment du réseau le plus proche. Troisièmement, les distances réticulaire et euclidienne sont calculées entre chaque point projeté et le point à partir duquel l'isochrone a été généré, et inversement. Cela permet de caractériser de manière bidirectionnelle la connectivité au sein de l'isochrone, et ainsi capter à coup sûr la présence de rue à sens unique et/ou piste cyclable unidirectionnelle pouvant grandement influencer la perméabilité filtrée d'un réseau. Quatrièmement, l'inverse du PRD est

calculé en divisant la somme des distances euclidiennes par la somme des distances réticulaires. L'inverse du PRD est utilisé afin que l'indicateur varie dans le même sens que les autres indicateurs, soit avec des valeurs élevées représentant une meilleure perméabilité. Ainsi, l'inverse du PRD varie théoriquement entre 0 et 1. Plus sa valeur est proche de 1, plus la connectivité est élevée. La figure suivante présente un exemple des points générés pour effectuer le calcul du PRD.

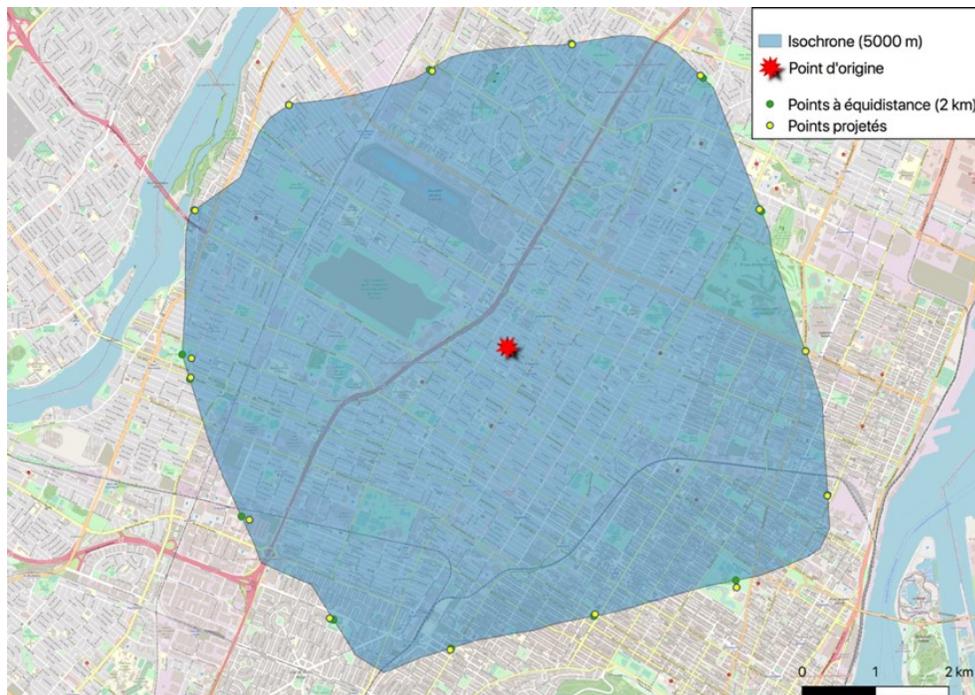


Figure 13. Exemple de points générés pour le calcul du PRD

Source : Carte produite dans QGIS.

Pour la dimension de la densité, le *metric reach* a été retenu puisqu'il représente une mesure très intuitive pour évaluer la densité d'un réseau. Il s'agit de la longueur totale du réseau (en kilomètres) à l'intérieur de l'isochrone (Pafka et Dovey 2017). Plus sa valeur est élevée, plus le réseau est dense. Aussi, il permet de bien capter la présence d'infrastructures cyclables, soit un élément important du principe de perméabilité filtrée. La figure suivante présente un exemple du *metric reach*.

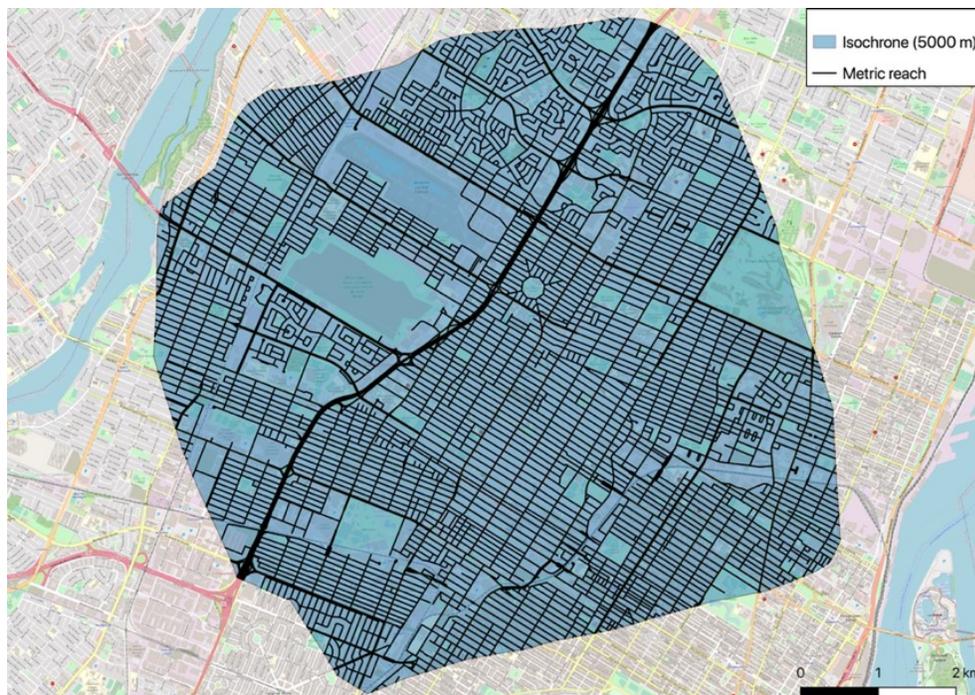


Figure 14. Exemple de *metric reach*

Source : Carte produite dans QGIS.

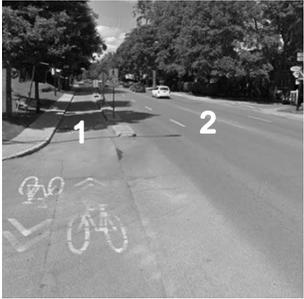
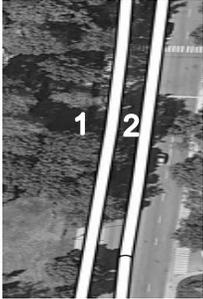
Bien évidemment, que ce soit à vélo ou en automobile, le sens de circulation a été pris en considération tout comme pour les deux autres indicateurs. Par contre, pour le calcul du *metric reach* à vélo, quelques ajustements ont été apportés afin de pallier à des enjeux dans la modélisation du réseau cyclable. Cinq cas ont été identifiés et illustrés au tableau 7 à l'aide d'une image du cas vu de la rue (à gauche) et une représentation de sa modélisation dans OSM (à droite):

- **Cas 1.** La présence d'une piste cyclable hors rue qui augmente la perméabilité filtrée. Aucun ajustement n'est nécessaire.
- **Cas 2.** Une piste cyclable séparée sur rue modélisée comme une piste cyclable hors rue le long d'une route. L'image de droite permet de constater que le réseau OSM est modélisé avec un segment pour la piste cyclable séparée sur rue et un autre segment pour la route. Aucun ajustement n'est donc nécessaire.
- **Cas 3.** À la différence du cas 2, une piste cyclable séparée sur rue peut aussi être modélisée comme étant partie intégrante de la route. Un seul segment représente alors à la fois la route et la piste cyclable séparée sur rue. Un ajustement est nécessaire : dans le calcul du *metric reach* pour le vélo la longueur du segment est multipliée par deux.

- **Cas 4.** La présence d'une bande cyclable qui n'augmente pas le niveau de perméabilité filtrée puisque le sens de circulation de celle-ci est le même que celui du tronçon routier. Aucun ajustement n'est nécessaire.
- **Cas 5.** La présence d'une bande cyclable qui augmente le niveau de perméabilité filtrée puisque le sens de circulation de celle-ci est à l'inverse de celui du tronçon routier. Un ajustement est nécessaire : dans le calcul du *metric reach* pour le vélo la longueur du segment est multipliée par deux.

Idéalement, dans le calcul du *metric reach* à vélo, il faudrait tenir uniquement compte des infrastructures cyclables augmentant le niveau de perméabilité filtrée. Il s'agit des pistes cyclables hors rue ainsi que pistes cyclables séparées sur rue et des bandes cyclables permettant aux cyclistes de circuler en sens inverse de la circulation motorisée (voir tableau 2 au besoin). À la différence des bandes cyclables (cas 5), il n'est malheureusement pas possible de cibler seulement ce type de piste cyclable séparée sur rue. En effet et tel qu'illustré dans le tableau 3, une piste cyclable séparée sur rue peut être modélisée de deux différentes façons (cas 2 et 3). Pour l'une d'elles (cas 2), il est impossible de la différencier d'une piste cyclable hors rue (cas 1). Comme il n'est pas envisageable de ne pas considérer les pistes cyclables hors rue, le calcul du *metric reach* à vélo inclut l'ensemble des pistes cyclables séparées, ce qui a pour effet de surestimer le niveau de perméabilité filtrée. Malgré tout, nous considérons qu'il ne s'agit pas d'une limite méthodologique puisqu'il est aujourd'hui largement admis que les infrastructures cyclables protégées sont une condition importante à l'atteinte d'un haut niveau d'utilisation du vélo (J. Pucher et Buehler 2008). À la différence des bandes cyclables, elles permettent d'augmenter considérablement le confort et la sécurité des cyclistes en réduisant les interactions potentielles avec les véhicules motorisés (Furth 2012). En ce sens, nous sommes d'avis que l'enjeu méthodologique venant d'être soulevé ne diminue en rien la qualité de l'indice de perméabilité filtrée. Au contraire, l'évaluation à la hausse du niveau de perméabilité filtrée permet en fait de refléter le confort et la sécurité qu'offrent les pistes cyclables séparées sur rue, soit deux éléments particulièrement importants dans l'approche de perméabilité filtrée.

Tableau 7. Exemples d'ajustements nécessaires pour calculer le l'indicateur du *metric reach* pour le réseau accessible au vélo

	Vue de la rue	Réseau OSM	Étiquetage dans la base de données et ajustements nécessaires
1. Piste cyclable hors rue			<i>Highway</i> = cycleway Aucun ajustement nécessaire; Longueur du réseau = longueur de la voie cyclable
2. Piste cyclable séparée comme une piste cyclable hors rue le long d'une route			1. <i>Highway</i> = cycleway 2. <i>Highway</i> = secondary <i>Cycleway:left</i> = no Aucun ajustement nécessaire; Longueur du réseau = longueur de la rue + longueur de la voie cyclable
3. Piste cyclable séparée sur rue comme faisant partie de la rue			<i>Highway</i> = secondary <i>Cycleway:left</i> = track Ajustement nécessaire pour mesurer la longueur du réseau comme dans le cas 2; Longueur du réseau = 2*longueur de la rue
4. Bande cyclable n'augmentant pas le niveau de perméabilité filtrée			<i>Highway</i> = residential <i>Oneway</i> = yes <i>Cycleway:right</i> = lane Aucun ajustement nécessaire; Longueur du réseau = longueur de la rue
5. Bande cyclable n'augmentant pas le niveau de perméabilité filtrée			<i>Highway</i> = residential <i>Oneway</i> = yes <i>Cycleway:left</i> = lane <i>Oneway:bicycle</i> = no Ajustement nécessaire pour représenter l'augmentation du niveau de perméabilité filtrée; Longueur du réseau = 2*longueur de la rue

Sources : Photos tirées de Google Street View et réseau d'OSM.

2.4.4 Formule

L'indice de perméabilité filtrée est calculé en trois étapes (à ne pas confondre avec les trois étapes présentées à la section 2.4.1 (*Approche générale*)). Premièrement, pour les trois dimensions les ratios vélo/voiture sont calculés, soit pour l'isochrone (R_i^I , eq. 1), le PRD (R_i^P , eq. 2) et le *metric reach* (R_i^M , eq. 3). Deuxièmement, afin de faciliter l'interprétation des résultats $R_i^{I'}$, $R_i^{P'}$ et $R_i^{M'}$ sont calculés pour que les ratios varient théoriquement de l'infini négatif à l'infini positif et soient centrés sur 0. De la sorte, si les isochrones du vélo et de l'automobile ont des superficies égales, alors $R_i^{I'}$ est égal à 0. Si l'isochrone du vélo est supérieure à celle de l'automobile, alors la valeur de $R_i^{I'}$ est supérieur à 0 (indiquant un avantage comparatif pour le vélo) et inversement. La même démarche s'applique aux deux autres ratios (eq. 2 et 3).

$$R_i^I = \frac{I_{iV}}{I_{iA}} \text{ and } R_i^{I'} = \begin{cases} R_i^I - 1, & \text{if } R_i^I \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^I} + 1, & \text{sinon} \end{cases} \quad [1]$$

$$R_i^P = \frac{P_{iV}}{P_{iA}} \text{ and } R_i^{P'} = \begin{cases} R_i^P - 1, & \text{if } R_i^P \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^P} + 1, & \text{sinon} \end{cases} \quad [2]$$

$$R_i^M = \frac{M_{iV}}{M_{iA}} \text{ and } R_i^{M'} = \begin{cases} R_i^M - 1, & \text{if } R_i^M \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^M} + 1, & \text{sinon} \end{cases} \quad [3]$$

avec I , P et M étant respectivement l'isochrone, le *pedestrian route directness* et le *metric reach* soit pour le vélo (V) ou l'automobile (A). Troisièmement, l'indice final est tout simplement la moyenne des trois ratios ajustés et s'interprète comme le nombre de fois que le réseau à vélo est plus perméable que celui en automobile et inversement lorsqu'il est négatif :

$$FP_i = \frac{1}{3}(R_i^{I'} + R_i^{P'} + R_i^{M'}) \quad [4]$$

En guise d'exemple, une valeur de 0,5 indiquerait que le réseau accessible en vélo est 50% plus perméable que celui pour l'automobile.

2.5 Calcul de l'indice de perméabilité filtrée au niveau d'une ville

Pour quantifier le niveau de perméabilité filtrée dans une ville, le calcul de l'indice est effectué à plusieurs reprises au sein de son territoire. Plus précisément, l'indice de perméabilité filtrée est calculé à partir du centroïde des cellules du jeu de données de LandScan de 2019. Ces cellules sont approximativement de 1 km² (30" X 30") et indiquent la population ambiante (moyenne sur 24 heures) (Oak Ridge National Laboratory 2019). Cette base de données a été développée en utilisant les meilleures données démographiques (recensement) et géographiques disponibles, des techniques d'analyse d'imagerie par télédétection dans un cadre de modélisation dissymétrique multivariée pour désagréger les données issues des recensements dans leurs limites administratives. Le recours à ce jeu de données s'inspire de la démarche de C. Barrington-Leigh et Millard-Ball (2020) l'ayant mobilisé pour évaluer l'évolution de la connectivité du réseau routier à l'échelle mondiale sur plusieurs décennies.

Quelques opérations sont effectuées pour s'assurer de la justesse des calculs. Tout d'abord, les centroïdes des cellules sont projetés sur le réseau le plus proche pouvant accueillir à la fois les cyclistes et automobilistes (pas sur une autoroute ou sur une piste cyclable hors rue par exemple). Le calcul de l'indice s'effectue à partir de ces points projetés. Par contre, ils doivent se situer à l'intérieur de la cellule. Autrement dit, les centroïdes étant projetés à l'extérieur de leur cellule sont retirés de la base de données. Ceci permet de ne pas calculer d'indice de perméabilité filtrée à partir de cellule ne contenant pas de réseau accessible à vélo et en automobile, ce qui est principalement le cas dans les grands espaces verts, dans les plans d'eau ou les aéroports. La figure suivante présente en exemple les cellules respectant ces critères et couvrant le territoire de l'agglomération de Montréal.

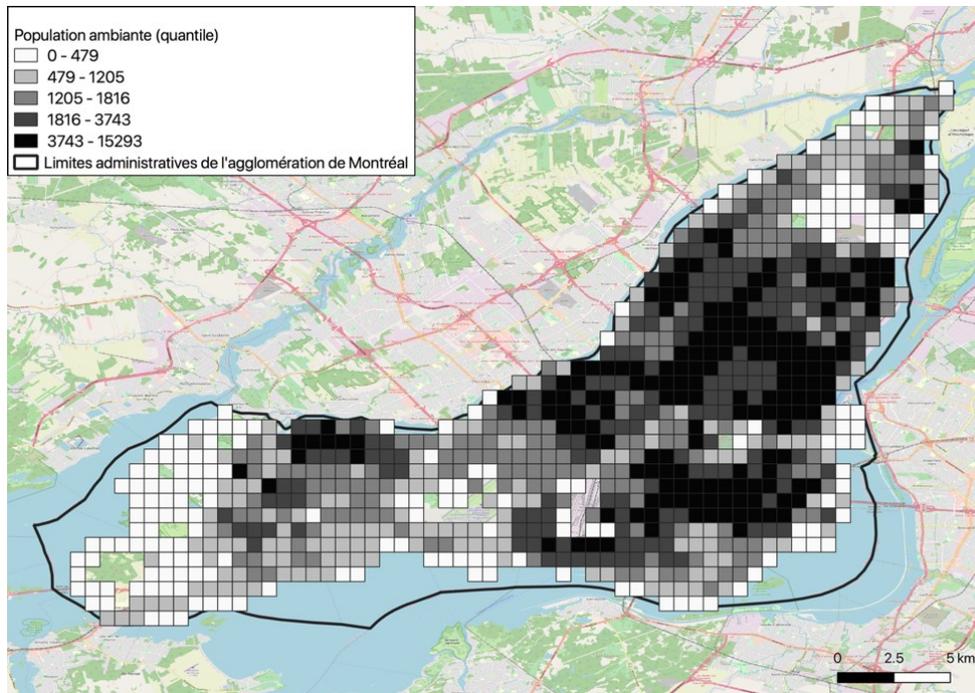


Figure 15. Exemple de cellules à partir desquelles l'indice de perméabilité filtrée est calculé

Source : Carte produite dans QGIS.

Une fois l'indice obtenu pour l'ensemble des cellules de la ville à l'étude, le niveau de perméabilité filtrée est agrégé sous forme d'une moyenne pondérée par la population ambiante. On s'assure ainsi de donner un poids plus important aux zones dans la ville avec une plus forte population ambiante et donc des niveaux d'activité plus élevés, générant potentiellement plus de déplacements.

2.6 Gestion des valeurs aberrantes

Certaines valeurs aberrantes sont générées lors des calculs. Il s'agit d'isochrones tracées non adéquatement, soit en plusieurs portions non reliées et/ou qui n'intersectent pas le point d'origine. Ces valeurs ont été retirées. Bien que la cause de l'erreur ne soit pas connue, ces valeurs aberrantes ne représentent que 3% des données. En effet, 2736 valeurs aberrantes ont été recensées sur les 88 584 indices calculés. La figure suivante illustre un exemple d'isochrone mal tracée.



Figure 16. Exemple d'isochrone mal tracée

Source : Carte produite dans QGIS.

2.7 Données et outils utilisés

Les données utilisées proviennent d'OpenStreetMap (OSM), soit une base de données *open source* gratuite et sous licence libre d'informations géographiques (OSM 2019). Comme l'encyclopédie *Wikipédia*, OSM est alimentée par des contributeurs volontaires et permet de consulter, modifier, exporter et utiliser librement ses données. Ce projet s'appuie donc sur les connaissances des collaborateurs, ce qui permet notamment une mise à jour rapide des données. Bien qu'OSM se concentre principalement sur le réseau routier, des données relatives aux bâtiments, à l'utilisation du sol, aux limites géographiques, aux éléments naturels, aux commerces et autres sont également accessibles. Les données d'OSM ont été utilisées puisqu'il s'agit de la seule source de données ouvertes permettant d'effectuer une analyse des réseaux de transport dans plusieurs villes à travers le monde (Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball 2017). Par contre, plusieurs études ont démontré que la qualité des données, à savoir leur précision spatiale et surtout leur exhaustivité varient à travers le monde (Brovelli et al. 2017 ; Gröchenig, Brunauer et Rehl 2014 ; Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball 2017). Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball (2017) estimaient qu'en janvier 2016, environ 83% du réseau routier mondial d'OSM était complet, dont 95% en Europe et en Amérique du Nord contre moins de 33% en Chine, Afghanistan et Égypte. Malgré tout, dès le début des années 2010, des études européennes ont démontré que les villes et lieux densément peuplés ont les réseaux routiers les mieux modélisés

(Neis, Zielstra et Zipf 2012 ; Haklay 2010). Concernant les infrastructures cyclables, Hochmair, Zielstra et Neis (2015) estimaient en 2015 que leur exhaustivité s'améliorerait rapidement dans les années à venir, et ce, considérant le haut taux de croissance du nombre total de kilomètres de réseau cyclable ajouté chaque année. Dans six des sept villes étudiées, le nombre de kilomètres de réseau cyclable modélisé dans OSM avait doublé entre 2009 et 2013 (Amsterdam, Berlin, Madrid, Portland, San Francisco et Washington DC). La tendance semble s'être maintenue puisque plusieurs études récentes s'entendent pour dire que les infrastructures cyclables sont aujourd'hui bien modélisées dans les grandes villes (C. Barrington-Leigh et Millard-Ball 2020 ; Ferster et al. 2020). Ces résultats nous donnent confiance quant à la qualité des données relatives aux réseaux routier et cyclable en 2020 pour les villes retenues dans l'analyse. En effet, les villes sélectionnées sont situées en grande partie en Amérique du Nord et en Europe et se caractérisent par une forte densité de population.

Les réseaux de transport des villes ont été téléchargés avec l'outil d'extraction *Humanitarian OpenStreetMap* (HOT). Il s'agit d'un service permettant d'extraire les données OSM les plus à jour au sein de la zone désirée. L'ensemble des voies de circulation dans une zone tampon de cinq kilomètres autour des villes retenues pour l'analyse ont été extraites. Par contre, les téléchargements sont limités à cinq par heure. Une option sans limites de téléchargement est celle de *GeoFabrik*, mais il n'est pas possible d'y effectuer des extractions personnalisées. Les données OSM peuvent y être téléchargées uniquement dans des limites administratives précises, soit par pays ou grandes régions géographiques. Ainsi, beaucoup de données sont téléchargées et non utilisées ce qui nécessite beaucoup de mémoire vive sans que ce soit nécessaire.

Les calculs menant à l'indice de perméabilité filtrée ont été effectués dans le logiciel R (R Core Team 2020) et avec le package *osrm* (Giraud, Cura et Viry 2017). L'image Docker publiée par OSRM a été utilisée; il s'agit de la façon la plus simple et rapide de mettre en place son propre moteur de routage (*routing engine*). Pour chaque ville, deux serveurs locaux étaient créés, soit un contenant le réseau accessible en automobile et le second à vélo. En moyenne, le temps nécessaire pour calculer l'indice de perméabilité filtrée à partir d'un point est de 80 secondes. Du *multiprocessing* a été utilisé pour accélérer le temps de calcul, abaissant le temps de calcul à environ 10 secondes. Les calculs ont pris approximativement 10 jours et 6 heures à s'effectuer.

D'autres options ont été considérées pour effectuer les calculs (Open Route Service (ORS), Iso4app, Hquis, Open Trip Planner (OTP), OSMnx), mais des limites dans le nombre de calculs pouvant être effectués par jour, les coûts financiers associés à un grand nombre de calculs,

l'impossibilité d'utiliser le réseau cyclable ou de tracer une isochrone basée sur une distance ont fait d'OSRM la meilleure option. Aussi, l'utilisation de R permet un plus grand contrôle sur le processus de calcul qu'avec certains des autres outils disponibles.

CHAPITRE 3 : RESULTATS

Formulaire d'inclusion d'un article au mémoire de maîtrise

1. Identification de l'étudiant

Nom, Prénom : Savaria, Maxime

2. Description de l'article

Titre :	Assessing filtered permeability: the unknown beloved principle of cycling cities
Nom des auteurs :	Maxime Savaria, Philippe Apparicio et Mathieu Carrier
Revue avec comité de lecture	Transportation Research Part D
État du cheminement :	<input checked="" type="checkbox"/> Publié date de publication : <u>1 juillet 2021</u> <input type="checkbox"/> Sous presse <input type="checkbox"/> Accepté moyennant modifications <input type="checkbox"/> Soumis
Résumé*	Cycling cities have one point in common: they are characterized by high levels of “filtered permeability” (FP), a principle that still isn't widely known or studied. In these cities, a cyclist's freedom of movement is considerably greater than a motorist's. The objective of this article is to operationalize this principle for the first time. For this purpose, a FP index had been developed and calculated in 60 cities throughout the world. The results demonstrate that the freedom of movement of a cyclist in a European city is on average 44% greater than a motorist's, which is a FP level about three times greater than what was measured in the other geographic areas studied (South and Central America, North America, Asia, Europe and Oceania). As other well-known factors (e.g. safety, accessibility, traffic calming measures), FP could be an effective dimension to create a

	<p>conducive urban environment for cycling and thus, promote more sustainable mobility behaviours.</p> <p>Les grandes villes cyclables ont un point en commun : elles sont caractérisées par de hauts niveaux de « perméabilité filtrée », un principe pourtant peu connu et étudié. Dans ces villes, la liberté de mouvement d'un.e cycliste est considérablement plus grande que celle d'un.e automobiliste. L'objectif de cet article est d'opérationnaliser pour la première fois ce principe. Pour ce faire, un indice de perméabilité filtrée a été développé et calculé dans 60 villes à travers le monde. Les résultats démontrent que le cycliste d'une ville européenne a une liberté de mouvement qui est en moyenne 44% plus importante que celle d'un.e automobiliste, soit un niveau de perméabilité filtrée environ trois fois supérieur à celui mesuré dans les quatre autres régions géographiques étudiées (Amérique Centrale et du Sud, Amérique du Nord, Asie, Europe et Océanie). Tout comme pour d'autres facteurs connus (sécurité, accessibilité, mesures d'apaisement de la circulation etc.), la recherche suggère que la perméabilité filtrée peut être une approche efficace pour créer un environnement propice à l'utilisation du vélo au détriment de l'automobile.</p>
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

* Si l'article est écrit dans une autre langue que le français, veuillez inclure également un résumé en français.

3. Contribution de chaque coauteur

Pour un article à plusieurs auteurs, veuillez détailler la contribution de chacun.

Identification du coauteur	Description de la contribution
Philippe Apparicio	Soutien méthodologique (conseils pour le choix et la mise en œuvre de la méthodologie), aide à l'écriture (relectures des différentes parties, commentaires et suggestions pour l'écriture et l'interprétation des résultats)

Mathieu Carrier	Soutien méthodologique (conseils pour le choix et la mise en œuvre de la méthodologie), aide à l'écriture (relectures des différentes parties, commentaires et suggestions pour l'écriture et l'interprétation des résultats)
--------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

4. Déclaration

À titre de coauteur de l'article mentionné ci-haut, j'autorise Maxime Savaria à intégrer l'article dans son mémoire de maîtrise.

Coauteur(e)

Signature

Date

Philippe Apparicio



14/04/2021

Mathieu Carrier



14/04/2021

Assessing filtered permeability around the globe: the unknown beloved principle of cycling cities

3.1 Introduction

The use of transport systems is not sustainable in most cities, which requires major changes in our policies and practices (Arsenio, Martens et Di Ciommo 2016 ; Black 2010 ; Schwanen, Banister et Anable 2011). Sustainability issues namely affect the ever-growing consumption of energy and resources to support mobility in urban zones (Gilbert et Perl 2010 ; Zawieska et Pieriegud 2018). These issues are also represented in high levels of noise and air pollution, crashes and congestion caused by motorized transport (Gössling 2016 ; Stanley, Hensher et Loader 2011). Within this context, initiatives targeting more sustainable urban mobility have multiplied over the last years (Holden, Gilpin et Banister 2019). Among these initiatives, several transport policies have the objective of stimulating a modal shift from car use towards active modes (Babalik-Sutcliffe 2013). In fact, it is now widely acknowledged that active modes have a major role to play in sustainable mobility (J. R. Pucher et Buehler 2012), whereas motorized transport is often considered as a major cause of sustainability issues (Banister 2005). To promote this modal shift, major efforts must be made to “rebalance” the effectiveness of these modes by developing urban environments that encourage cycling and walking and discourage car use (Aldred et Croft 2019 ; Banister 2008). In combination with environmental elements, some European cities have achieved this through planning transport networks characterized by a high level of “filtered permeability” (Melia 2015). In these cities, a person's freedom of movement is significantly increased if he or she travels by active modes rather than by car (Melia 2008). In fact, the network available to cyclists and pedestrians is denser, more widespread and better connected, which has the effect of “filtering out” cars. This makes a route more direct by bicycle or on foot, which tends to favour their use.

Very few studies have examined the principle of filtered permeability and none of them have attempted to operationalize it yet. In fact, most of the few studies existing on the subject are based on observations and not on quantitative analyses (Melia 2012). This article targets a methodological contribution by suggesting the first filtered permeability index. This index was applied to 60 cities to analyze its variability throughout the world. To our knowledge, it is the first large-scale study conducted on the theme of filtered permeability.

3.2 Literature review

3.2.1 Filtered permeability: definition and criticism

The term “filtered permeability” (FP) was proposed by Steve Melia (2008) and officially used for the first time in 2008 in the British government’s guidelines for their ecological cities program (TCPA 2008). It was also endorsed the same year in the *Take Action on Active Travel* declaration signed by 106 organizations – almost entirely British – concerned by public health and transport planning (Sustrans 2008). Since then, it has been progressively integrating the transport planning lexicon and we can also refer to it by employing the term *modal filtering* (Aldred, Croft et Goodman 2019).

The term *permeability* refers to the capacity of a network to allow movement (Stangl 2019). More specifically, the concept of FP is intended to render active transportation networks more permeable than motor vehicle networks (Melia 2008), thereby allowing greater freedom of movement. In other words, pedestrians and cyclists would benefit from a network exempt from the constraints applied to cars. The FP level would thereby depend on the significance of these constraints and exemptions. Therefore, we hope that the higher the level, the more people will be walking or cycling. In fact, it is considered that with an increased FP level on a given territory, active transport will be seen more often as the most advantageous option for getting around. Even though the principle of FP targets both pedestrians and cyclists, here we will focus on cycling since it is recognized as an effective mode for most urban travel (Fishman 2016); and thereby as a more competitive mode than walking when compared to driving.

The notion of FP is in direct opposition with permeability called “unfiltered” which is very present throughout the world, more particularly in North America (Melia 2012). A territory characterized by unfiltered permeability offers the same freedom of movement to cyclists and motorists, since they have access to the same network. In these conditions, driving will often emerge as the fastest option and will be favoured (Rietveld et Daniel 2004). It should be noted that the FP approach is subject to two main criticisms: first, that only cycling will be favoured at the expense of the other modes (Aldred, Croft et Goodman 2019); and second, it could generate a great deal of congestion on certain routes that the motorists would be directed to (Aldred et Croft 2019). In addition, generally any action seeking to restrict the use of private motor vehicles faces resistance due to

people’s attachment to driving (Domarchi, Tudela et González 2008 ; Tertoolen, Van Kreveld et Verstraten 1998).

3.2.2 Factors influencing a network’s filtered permeability level

Different strategies can be used to increase the FP level on a territory and be applied at different scales. For example, they can be applied around a specific place (school, park, business, etc.) on a traffic route or within a specific zone going from a block to a neighborhood, to a city.

A classification of measures that can influence the FP level is proposed in Table 8. Four main measures and one secondary measure are defined there. They can also be qualified as *modal filters* since their objective is to facilitate the movement of cyclists as much as possible and regulate the movement of motorists (Aldred et Croft 2019). For this purpose, FP measures can be of a physical, legal and/or time-based order.

Tableau 8. Filtered permeability measures

Measure	Description
Additional routes ^a	Presence of routes reserved for cyclists only (example: cycling infrastructure on its own right-of-way).
Physical obstacles ^a	Arrangement of physical obstacles limiting car access to certain sections of the street while allowing for the passage of cyclists (example: posts, block, fence, barrier, etc.); can create a cul-de-sac effect only for motor vehicles.
Signage ^a	Signage to restrict motor vehicle access to a section of the street, without restricting cyclists (example: no left turn, local traffic only, etc.).
One way ^a	Presence of streets that are one way for motor vehicles, but not for cyclists.
Traffic easing measures ^b	Arranging streets and intersections to prioritize cycling and control drivers’ behaviour (interchange, speed bumps, priority at intersections, road markings, managing speed limits, etc.); in order to increase cyclists’ comfort.

^a Primary measures. ^b Secondary measures. Sources: Partially inspired by City Infinity (2018) and Sustrans (2015).

Traffic easing measures are identified as a secondary measure since they have a less direct influence on the FP level of a network. They can be used alongside the four primary measures to maximize their effectiveness and increase the comfort of cyclists.

In summary, FP measures allow us to create an urban environment more conducive to cycling by providing shorter routes for cyclists compared to motorists. However, this is not the only benefit of these measures. They also increase the comfort and sense of safety of cyclists by helping to reduce the volume and speed of motor vehicles traffic, which are two known factors that discourage cycling (P. Schepers et al. 2017). For example, FP measures (physical obstacles,

signage, one way, etc.) can be applied in a residential zone to eliminate transit traffic and create a safer environment (Aldred 2015). Also, they can limit interactions between cyclists and motor vehicles by separating them. Therefore, cycling would be favoured even more because fear of getting injured by a car is a major deterrent to this activity (Sanders 2015 ; Winters et al. 2011).

Cycling infrastructures can also have an impact on the FP level. In Table 9, we identified the four main types of bike lanes (Furth 2012) along with, according to us, their potential impacts on the FP level of a network.

Tableau 9. Main types of cycling infrastructures and their impacts on filtered permeability

Cyclable infrastructure	Characteristics	Impact on filtered permeability level
Shared streets and shared lanes	No dedicated space, cyclists circulate with motor traffic.	Unfiltered permeability
Bike lanes	Road markings indicating the space that cyclists can use alongside motor traffic.	Increase the FP level if it allows cyclists to circulate in both directions on a one-way street. Corresponds with the 4th (one way) and to a lesser extent the 3 rd (signage) main FP measure.
Separated paths	Path physically separated by a barrier alongside road traffic.	Increases user comfort and the FP level if it allows cyclists to circulate in both directions on a one-way street. Corresponds with the 4th (one way) and to a lesser extent the 3 rd (signage) main FP measure.
Standalone paths	Cycling infrastructure on their own right-of-way, meaning they are isolated from motor traffic.	When wisely positioned, these bike paths can significantly increase the FP level; corresponds with the 1 st main FP measure (additional route).

3.2.3 Application places of filtered permeability

Several of the cities with higher modal shares of cycling are characterized by a significant presence of FP measures (Aldred, Croft et Goodman 2019 ; Melia 2015 ; P. Schepers et al. 2017). These cities are mostly European, and are namely located in Denmark, Germany, the Netherlands, Belgium and Sweden (Melia 2015). Despite this, other cities like Vancouver, Seattle (Washington), Portland and Bend (Oregon) on the west coast of North America or Auckland and Christchurch in New Zealand have also used the FP approach to set up *bicycle boulevards* (Koorey 2012 ; Ma et Dill 2015). These are zones where FP measures provide direct and safe routes to connect residents with parks, schools, commercial streets and other destinations of interest.

3.2.4 Filtered permeability and its impact on cycling

To our knowledge, only two studies have attempted to quantitatively assess the effect of a territory's FP level on cycling (Aldred 2015 ; Aldred, Croft et Goodman 2019). Aldred et Croft (2019) conducted a one-year longitudinal study on the mobility habits of the residents of three London neighborhoods where interventions had significantly increased the FP level. Their results show an increase in the active mobility of this population, which suggests that the implementation of FP measures can have quick and significant impacts on cycling. For example, it was 24% more probable that the population travelled by bicycle at least once during the last week after the interventions.

Using a questionnaire with 1,958 adults in London, Aldred (2015) explored their attitudes regarding ten types of cycling infrastructures, in which one involved FP measures. It was a residential street where motor vehicle access had been eliminated with a barrier while letting cyclists through. The respondents also evaluated cycling infrastructures according to five situations (on own, carrying child, with an eight-year-old, by 12-year-old, most people). The cycling infrastructure involving FP was the one that obtained the best average score. These results suggest that the FP measures targeted in the article (physical obstacles and traffic easing measure) create an environment that is among the most appreciated by cyclists and for different types of situations.

3.3 Research objectives

The concept of FP remains sparsely mobilized in the field of active-transport planning even though it has been shown to promote cycling and helps to achieve sustainable mobility objectives. In addition, although the factors favouring FP are known, no study to date has proposed to operationalize it. To fill this gap, an index was set up – based on the three dimensions characterizing a network (configuration, density and connectivity) – to quantify the FP level on a territory. In a scoping-out process, the index was then calculated in 60 cities to analyze the variability of the FP level throughout the world. Therefore, the article's contribution is both methodological and empirical.

3.4 Methodology

3.4.1 Selected Cities

Sixty cities throughout the world were selected based on four criteria (Table 10). First of all, we retained six European cities identified with a high FP level according to Melia (2015) and Foletta (2011): Fribourg, Groningue, Houten, Malmö, Maastricht and Munster. Secondly, this number being somewhat limited (6), we added the 20 cities from the 2019 rankings of the well-known Copenhagenize Index (Copenhagenize Design Company 2019), thereby identifying the most bicycle-friendly cities around the world. We could then suppose that the FP level is relatively high in these cities.

Thirdly, North American cities being recognized as having a low FP level compared to European cities (Melia 2012), the central cities of 15 metropolitan North American areas were retained (7 Canadian, 8 from the United States), which are those having the highest modal shares for commuting to work by bicycle in 2011 (CMM 2017). Among these 15 cities, note that Montreal and Vancouver are also listed on the 2019 Copenhagenize Index.

Fourthly, to extend the geographic selection by continents, 21 cities were added: Mexico City for the region of North America, and cities that are among the largest in Central and South America (n=7), Asia (n=8) and Oceania (n=5). However, no African city was selected as, according to Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball (2017), the *OpenStreetMap* data (OSM) used within this research are very incomplete. In addition, no Russian city could be selected due to a major difference in the calculation of cycling routes with the OSM network, which would have skewed the comparison with the other cities. In other words, only cyclists can use the road segments tagged as *service*, whereas in other cities, these segments are accessible or not accessible to both motorists and cyclists; therefore, cyclist accessibility would have been greatly overestimated.

Tableau 10. Cities selected per geographic region and according to the four selection criteria (population in brackets)

Asia (n=10)	Central and South America (n=8)	Europe (n=21)		North America (n=16)		Oceania (n=5)
Beijing ^d (20 445 672)	Bogotá ^b (7 302 020)	Amsterdam ^b (820 085)	Houten ^a (49 908)	Boston ^c (864 153)	Sacramento ^c (589 070)	Auckland ^d (1 685 306)
Hong Kong ^d (7 245 647)	Buenos Aires ^d (3 153 789)	Antwerp ^b (477 582)	Ljubljana ^b (295 910)	Calgary ^c (1 319 303)	San Francisco ^c (1 015 133)	Brisbane ^d (1 215 471)
Jerusalem ^d (1 198 479)	Havana ^d (1 685 595)	Barcelona ^b (1 377 959)	Maastricht ^a (124 074)	Denver ^c (787 832)	Seattle ^c (869 346)	Christchurch ^d (383 895)
Kyoto ^d (2 590 489)	Lima ^d (9 184 642)	Berlin ^b (3 429 725)	Malmö ^a (320 109)	Edmonton ^c (992 985)	Toronto ^c (2 905 885)	Melbourne ^d (4 731 843)
Manila ^d (1 879 368)	Quito ^d (2 653 698)	Bordeaux ^b (174 024)	Münster ^a (286 403)	Los Angeles ^c (3 914 318)	Vancouver ^{b, c} (674 307)	Sydney ^d (4 760 150)
Seoul ^d (9 877 221)	Rio of Janeiro ^d (6 655 654)	Bremen ^b (537 675)	Oslo ^b (689 464)	Mexico City ^d (9 084 056)		
Shanghai ^d (23 999 047)	Santiago ^d (6 354 100)	Copenhagen ^b (619 475)	Paris ^b (2 155 747)	Montreal ^{b, c} (1 806 894)		
Taipei ^b (2 683 357)	Sao Paulo ^d (12 249 618)	Freiburg ^a (224 716)	Strasbourg ^b (179 647)	Ottawa ^c (993 979)		
Tokyo ^b (12 904 450)		Groningen ^a (196 572)	Utrecht ^b (330 944)	Phoenix ^c (1 779 563)		
Yerevan ^d (1 094 755)		Hamburg ^b (1 764 847)	Vienna ^b (1 892 206)	Portland ^c (724 306)		
		Helsinki ^b (648 179)		Quebec City ^c (565 972)		

Population according to LandScan 2019. ^a Cities with high FP levels according Melia (2015) and Foletta (2011); ^b Top 20 in the Copenhagenize ranking; ^c North American cities; ^d Cities to increase the geographic scope.

3.4.2 Filtered permeability index

3.4.2.1 General approach and dimensions retained to assess permeability

The construction of the FP index is based on two steps. First, for each city, the degree of freedom of movement offered by the network accessible by bicycle and by car is measured. Secondly, we calculate the ratio between the permeability level of those two networks. Thus, this ratio allows us to assess the degree of effectiveness of the network for bicycles compared to that for cars.

It remains to be seen which dimensions and indicators should be retained to assess the permeability of the network accessible to both modes of transport. A literature review allowed us to target 15 permeability indicators. They were categorized in three dimensions (W. E. Marshall, Piatkowski et Garrick 2014), which are configuration, connectivity and density (Table 11).

Tableau 11. Classification of permeability indicators

Dimension	Indicator	Description
Configuration	Size of blocks	Characterization of the shape of blocks in a study area (area, length, width, diagonal, etc.).
	Type of network	Indication on type and configuration of the intersections or segments of a network (number of cul-de-sacs, number of three-lane intersections, number of bridges, number of loops, etc.).
	Closeness centrality	Calculation of proximity between nodes: $C(x) = n / \sum_y d(x, y)$ n represents the total number of nodes and $d(x, y)$ the distance between nodes x and y .
	Betweenness centrality	Characterizes the importance of nodes: $B(v) = \sum \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$ σ_{st} represents the number of the shortest routes between all the network nodes and $\sigma_{st}(v)$ is the number of these routes passing through nodes v
	Directional reach	Sum of the network length accessible from a point and for a given distance and/or for a number of given changes of direction.
	Isochrone	Area accessible from a point and for a given route distance.
Connectivity	Connected node ratio	$n / (n + d)$; n represents the number of intersections and d is the number of cul-de-sacs.
	Link node-ratio	Characterize the complexity of a network e / v ; e represents the number of links and v the number of nodes.
	Pedestrian route directness	Ratio between the reticular distance and the Euclidian distance between two points.
	Gamma index	Characterize the degree of connectivity in relation to a theoretical maximum number of links $e / 3(v - 2)$; e represents the number of links and v the number of nodes.
	Alpha index	Ratio between the number of circuits in a network and the maximum number of circuits that it can have $(e - v + 1) / (2 * v - 5)$; e represents the number of links and v the number of nodes.
Density	Density of intersection	Number of intersections in the zone of study / zone of the study area
	Density of network	Network length in the zone of study / zone of the study area.
	Density of islands	Number of islands in the zone of study / zone of the study area.
	Metric reach	Total length of network accessible from a point and for a given route distance.

Inspired, among others, by Berrigan, Pickle et Dill (2010), Dill (2004) and Ellis et al. (2016).

In order to facilitate the index calculation and reduce the calculation time for the 60 cities, we have retained one indicator per dimension. Furthermore, the unit chosen for the FP index is distance, since it is commonly used in studies on the permeability of a network as shown in Table 11.

3.4.2.2 Choice and justification of the three retained indicators

For the configuration's dimension, we have chosen the *isochrone* representing the area that could be reached from a point of origin for a given route distance. The isochrone was selected since it offers an indication on a key element of the FP principle, which is freedom of movement. The higher the reached area, the more the network offers freedom of movement. Note that a distance of 5,000 metres was used to calculate the isochrone, which is approximately the average travelling distance for cyclists in several cities (Damant-Sirois et El-Geneidy 2015 ; Dill 2009 ; Lawson et al. 2013 ; Winters et al. 2010).

For the connectivity's dimension, the retained indicator is the *pedestrian route directness* (PRD) which is the ratio between reticular and Euclidian distances between two points (Hess 1997). The PRD varies theoretically between 1 and infinity. A value of 1 indicates that the two points have a perfect connection: the route linking them being the shortest possible one, which is a straight line. Conversely, the higher the indicator, the more the route between the two points is sinuous and disconnected. It allows one to assess the effectiveness of a network to offer a direct route between an origin and a destination. This explains why it's considered as the best connectivity measure for active modes (Dill 2004). According to us, PRD assesses an important element of the concept of FP, which is that the routes must be more direct for cyclists than for motorists.

Inspired by Stangl (2019), the PRD calculation is made on several occasions between different pairs of points within the isochrone of 5,000 metres. First of all, the points are positioned along the isochrone perimeter at an equidistance of two kilometres. The two kilometres threshold was used since it usually allows us to have between 10 and 19 points, which is a sufficient number to characterize the network's connectivity without extending the calculation time. Secondly, these points are snapped onto to the network's closest segment. Thirdly, the reticular and Euclidian distances are calculated between each snapped point and the point from which the isochrone was generated, and vice versa. This allows us to characterize the connectivity within the isochrone in a bidirectional manner, and thus capture the presence of a one-way street and/or one-way bike lane that can greatly influence the FP of a network. Fourthly, the opposite of PRD is obtained by dividing the sum of the Euclidian distances by the sum of the reticular distances. Thereby, the opposite of PRD theoretically varies from 0 to 1: the more its value approaches 1, the higher the connectivity.

For the density's dimension, the *metric reach* was retained since it represents a very intuitive measure for assessing the density of a network. It is the total length of the network (in kilometres) within the isochrone (Pafka et Dovey 2017). The higher its value, the denser the network. Also, it allows us to fully capture the presence of cycling infrastructures, which is an important element of the principle of FP. Adjustments were made when calculating the metric reach for cycling in order to address issues in the modelling of the cycle network (see the detailed description of these adjustments in the supplementary material).

3.4.2.3 Formula

The FP index is calculated in three steps. Firstly, we calculate the bicycle/car ratios for the indicators regarding the three dimensions, which is for the isochrone (R_i^I , eq. 1), PRD (R_i^P , eq. 2) and the metric reach (R_i^M , eq. 3). Secondly, we calculate $R_i^{I'}$, $R_i^{P'}$ and $R_i^{M'}$ so that the ratios theoretically vary from negative infinity to positive infinity and are based on 0, which facilitates the interpretation of the results. This way, if the isochrones of bicycle and car have equal areas, then $R_i^{I'}$ is equal to 0. If the bicycle isochrone is greater than that of the car, then the value of $R_i^{I'}$ is greater than 0 (indicating a comparative advantage for cycling), and conversely. The same process applied to the two other ratios (eq. 2 and 3).

$$R_i^I = \frac{I_{iB}}{I_{iC}} \text{ and } R_i^{I'} = \begin{cases} R_i^I - 1, \text{ if } R_i^I \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^I} + 1, \text{ otherwise} \end{cases} \quad [1]$$

$$R_i^P = \frac{P_{iB}}{P_{iC}} \text{ and } R_i^{P'} = \begin{cases} R_i^P - 1, \text{ if } R_i^P \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^P} + 1, \text{ otherwise} \end{cases} \quad [2]$$

$$R_i^M = \frac{M_{iB}}{M_{iC}} \text{ and } R_i^{M'} = \begin{cases} R_i^M - 1, \text{ if } R_i^M \geq 1 \\ -\frac{1}{R_i^M} + 1, \text{ otherwise} \end{cases} \quad [3]$$

with I , P and M being respectively isochrone, pedestrian route directness and metric reach either for bicycles (B) or cars (C). Thirdly, the final index is simply the average of the three adjusted ratios and is interpreted as the number of times that the cycling network is more permeable than the motor vehicle network and conversely when it is negative:

$$FP_i = \frac{1}{3} (R_i^{I'} + R_i^{P'} + R_i^{M'}) \quad [4]$$

For example, a value of 0.5 would indicate that the network accessible to cycling is 50% more permeable than the motor vehicle network.

3.4.3 Calculation of the permeability index at the intra-urban level

To assess the FP level within a city, the index is calculated from the centroid of the 2019 Landsat dataset cells. These cells are approximately one km² (30" X 30") and indicate the ambient population (average over 24 hours) (Oak Ridge National Laboratory 2019). The use of this dataset is inspired by the process that C. Barrington-Leigh et Millard-Ball (2020) mobilized to assess the evolution of the road network's connectivity on a worldwide scale over several decades.

Once the index is obtained for all the cells covering a city, it is then possible to weight the results per ambient population and obtain the average FP level within the city. Thereby we ensure that more weight is given to city zones with a higher ambient population and therefore higher activity levels, potentially generating more travelling.

3.4.4 Data and tools used to calculate the index

The data used comes from *OpenStreetMap* (OSM), which is the only open-source software allowing the analysis of transport networks in several cities throughout the world (Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball 2017). However, many studies have demonstrated that the quality of the data, meaning their spatial accuracy and their completeness, varies throughout the world (Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball 2017 ; Brovelli et al. 2017 ; Gröchenig, Brunauer et Rehl 2014). Christopher Barrington-Leigh et Millard-Ball (2017) estimate that in January 2016 about 83% of the OSM worldwide road network was complete, including 95% in Europe and North America, compared to 33% in China, Afghanistan and Egypt. However, two cities were selected in China (Shanghai and Beijing) since our inspection of their OSM networks suggests that it is well modelled for both car and bicycle. This observation is consistent with recent studies that conclude that bicycle networks are well modelled in densely populated cities (C. Barrington-Leigh et Millard-Ball 2020 ; Ferster et al. 2020). These results give us confidence about the current quality of OSM data relating to road and cycle networks for the cities retained for the analysis.

The cities' transport networks were downloaded with the *Humanitarian OpenStreetMap* (HOT) extraction tool. The calculations leading to a FP index were made in the R software (R Core Team 2020) and with the OSRM package (Giraud, Cura et Viry 2017). Docker image published by OSRM was used; this is a simpler and faster way to set up one's own routing engine.

3.5 Results

3.5.1 Ranking of cities according to the filtered permeability index and regional analyses

The results of the average FP index weighted by the ambient population (named FPw) for the 60 cities are present in Table 12 and Figure 17. Note that the index was also calculated with the weighted median (not presented here for parsimony's sake) with very similar results that only slightly affect the cities' rankings.

As illustrated in Table 12 and in Figure 17, the results vary significantly according to the five world regions (Anova: $F(4,55) = 20.87$, $p < 0.001$, $\text{Eta}^2 = 0.603$). More specifically, the selected European cities have higher FPw levels than those measured in the other four regions of the world; the latter present very similar FPw levels amongst themselves (not statistically different according to Tukey's test, Table 15, supplementary material). On average, the FPw level is three times higher in Europe than in the other geographical regions.

The top 17 places are occupied by European cities. Only Bogotá and Calgary, in 18th and 19th place, stand out among 23 European cities. Bogotá's strong performance is not surprising with the abundant policy-related literature explaining the emergence of the cycling in this city (Rodriguez-Valencia et al. 2019 ; Rosas-Satizábal et Rodriguez-Valencia 2019). This also explains that Bogotá is the only global South city retained in the 2019 Copenhagenize Index. Even though Calgary's cycle network has been less studied, a sustained effort through the years to promote cycling combined with recent urban development on part of its territory can explain this good result (Tsenkova et Mahalek 2014).

Moreover, seven of the eight cities in the USA are ranked in the last twenty positions with an average of 0.11. Therefore, the FPw level there is 4 times lower than in European cities (mean = 0.44). In addition, unsurprisingly and even though there is great variability among the 20

cities of the Copenhagenize rankings (mean= 0.37; sd = 0.20), they present FPw levels higher than the other 40 cities (mean = 0.19; sd = 0.13), which is a significative difference (Welch's test: $t = 3.56$; $p = 0,001$).

Tableau 12. Cities listed according to their average filtered permeability index weighted by the ambient population

Rank	City	Weighted average (standard deviation)	Rank	City	Weighted average (standard deviation)	Rank	City	Weighted average (standard deviation)
1	<i>Helsinki</i> ^a	1.01 (0.58)	21	<i>Bordeaux</i> ^a	0.28 (0.12)	41	Kyoto	0.14 (0.66)
2	<i>Oslo</i> ^a	0.71 (1.53)	22	<i>Barcelona</i> ^a	0.27 (0.75)	42	<u>Portland</u>	0.14 (0.18)
3	<i>Freiburg</i>	0.59 (0.61)	23	<i>Paris</i> ^a	0.26 (0.10)	43	<u>Toronto</u>	0.13 (0.09)
4	<i>Bremen</i> ^a	0.51 (0.34)	24	Taipei ^a	0.26 (0.49)	44	Shanghai	0.13 (0.32)
5	<i>Houten</i>	0.51 (0.34)	25	<u>Ottawa</u>	0.25 (0.16)	45	Jerusalem	0.13 (0.46)
6	<i>Antwerp</i> ^a	0.50 (0.33)	26	Melbourne	0.23 (0.24)	46	<u>Denver</u>	0.12 (0.12)
7	<i>Malmö</i>	0.48 (0.22)	27	<u>Rio of Janeiro</u>	0.21 (0.34)	47	<u>Lima</u>	0.12 (0.35)
8	<i>Groningen</i>	0.45 (0.28)	28	<u>Edmonton</u>	0.21 (0.25)	48	Sydney	0.12 (0.24)
9	<i>Münster</i>	0.43 (0.27)	29	Brisbane	0.20 (0.32)	49	<u>Boston</u>	0.11 (0.11)
10	<i>Utrecht</i> ^a	0.42 (0.31)	30	<u>Mexico City</u>	0.19 (0.33)	50	<u>Sao Paulo</u>	0.11 (0.26)
11	<i>Ljubljana</i> ^a	0.39 (0.30)	31	Seoul	0.17 (0.22)	51	<u>Seattle</u>	0.11 (0.14)
12	<i>Strasbourg</i> ^a	0.37 (0.22)	32	Tokyo ^a	0.17 (0.42)	52	<u>Sacramento</u>	0.11 (0.09)
13	<i>Amsterdam</i> ^a	0.36 (0.40)	33	<u>Santiago</u>	0.16 (0.33)	53	Auckland	0.11 (0.25)
14	<i>Vienna</i> ^a	0.36 (0.56)	34	<u>Buenos Aires</u>	0.16 (0.11)	54	<u>Vancouver</u> ^a	0.10 (0.06)
15	<i>Copenhagen</i> ^a	0.34 (0.30)	35	Hong Kong	0.16 (0.63)	55	<u>Los Angeles</u>	0.10 (0.15)
16	<i>Maastricht</i>	0.33 (0.46)	36	Christchurch	0.15 (0.50)	56	<u>Phoenix</u>	0.08 (0.32)
17	<i>Berlin</i> ^a	0.32 (0.36)	37	<u>Quebec City</u>	0.15 (0.37)	57	Yerevan	0.07 (0.23)
18	<u>Bogotá</u> ^a	0.31 (0.31)	38	<u>San Francisco</u>	0.14 (0.08)	58	<u>Quito</u>	0.07 (0.56)
19	<u>Calgary</u>	0.31 (0.25)	39	<u>Montreal</u> ^a	0.14 (0.16)	59	Manila	0.06 (0.20)
20	<i>Hamburg</i> ^a	0.29 (0.38)	40	Beijing	0.14 (0.37)	60	<u>Havana</u>	0.02 (0.44)

Asian cities; Central and South American cities; *European cities*; North American cities; **Oceanic cities**.^a City ranked in the 2019 Copenhagenize Index.

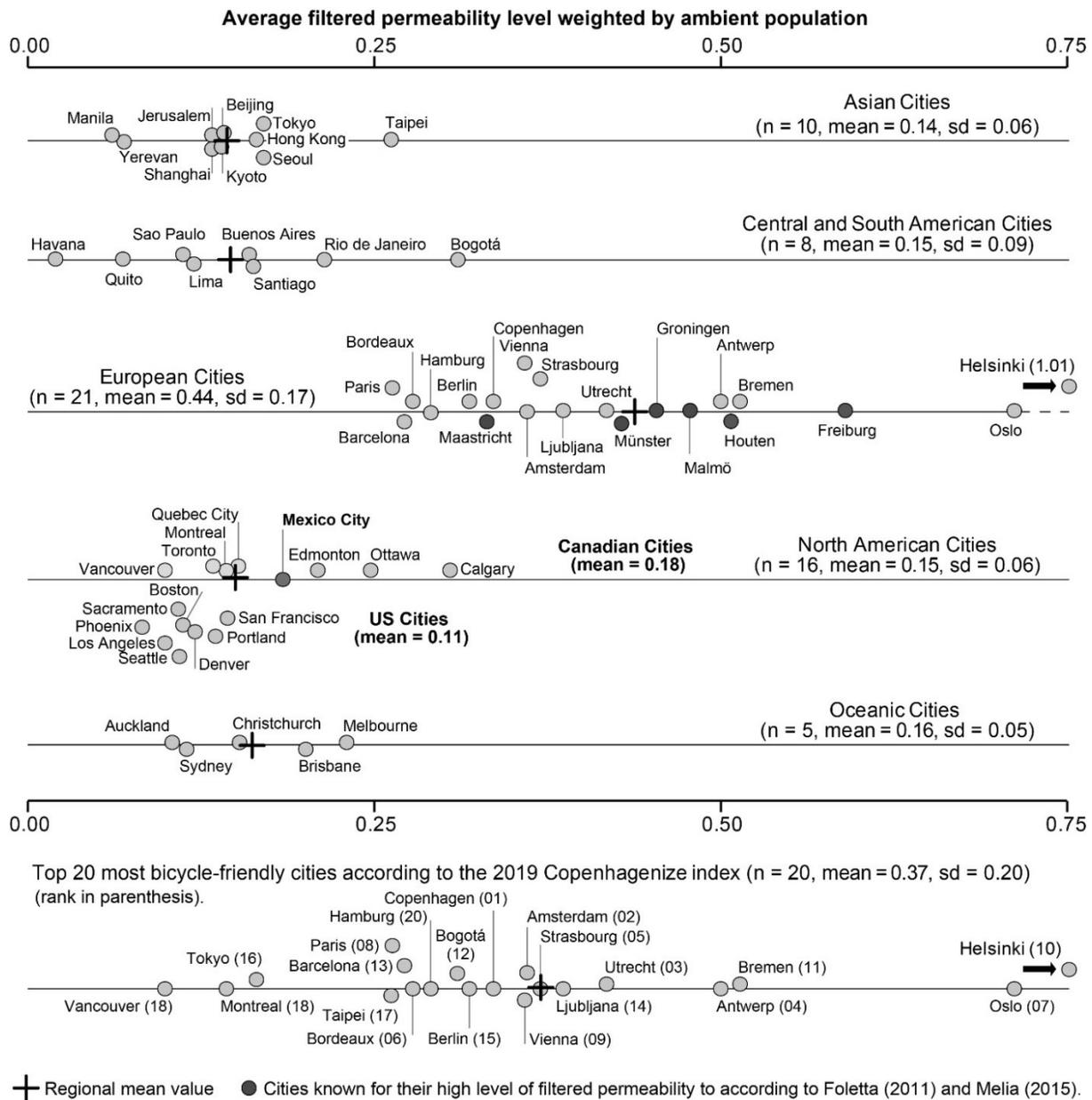


Figure 17. Permeability level of cities according to their geographic region

3.5.2 Breakdown of intra-urban filtered permeability indicators and analyses

To illustrate how FP varies within cities, we propose the analysis of three cities: Helsinki and Houten at the head of the pack (1st and 5th place) and Phoenix at the bottom of the ranking (56th place). To analyze other cities, the reader can consult the FP index maps for each of the 60 cities (Annex 2, Figures 22 to 81). Also, on Table 14 of the Annex 1, the average value of the three

dimensions were tabled – configuration, connectivity, density – thereby allowing to observe the dimension(s) contributing most to the ranking of each city.

3.5.2.1 Helsinki: an example of filtered permeability mainly based on density

With an average weighted score of 1.01, the city of Helsinki has the highest FPw level, comfortably ahead of Oslo in second place (0.71). In concrete terms, this means that the average permeability of Helsinki's network accessible to cyclists is 101% higher than that of the motorists. The breakdown of the index per dimension (Table 14, Annex 1) demonstrates that, above all, the network density explains Helsinki excellent FPw level. In fact, the network accessible to cyclists is on average 2.37 times denser than that for motorist (Figure 18a), a result that is incomparable to other cities.

In Figure 18a, the quantile mapping of the index allows us to clearly distinguish two zones with different FP levels. In the first zone, in the northwest of the city, the high level of FP is explained by a high density of dedicated bicycle paths whose connectivity and configuration make travel by bicycle more direct than by car. In fact, several green spaces break up the urban framework and can only be crossed by bicycle. In addition, interchanges allow cyclists to cross main roads at several points. In contrast, in the second zone, which is the city centre, a grid-shaped network combined with a low presence of FP measures cause the FP level to be much lower. These results also support the development trends for new cycling infrastructures in the city of Helsinki. In fact, in the more recent report on bicycle use (Helsinki's Urban Environment Division 2019), it is indicated that the planned construction of new cycling infrastructure will be mostly developed in the city centre, where we had observed a lower FP level.

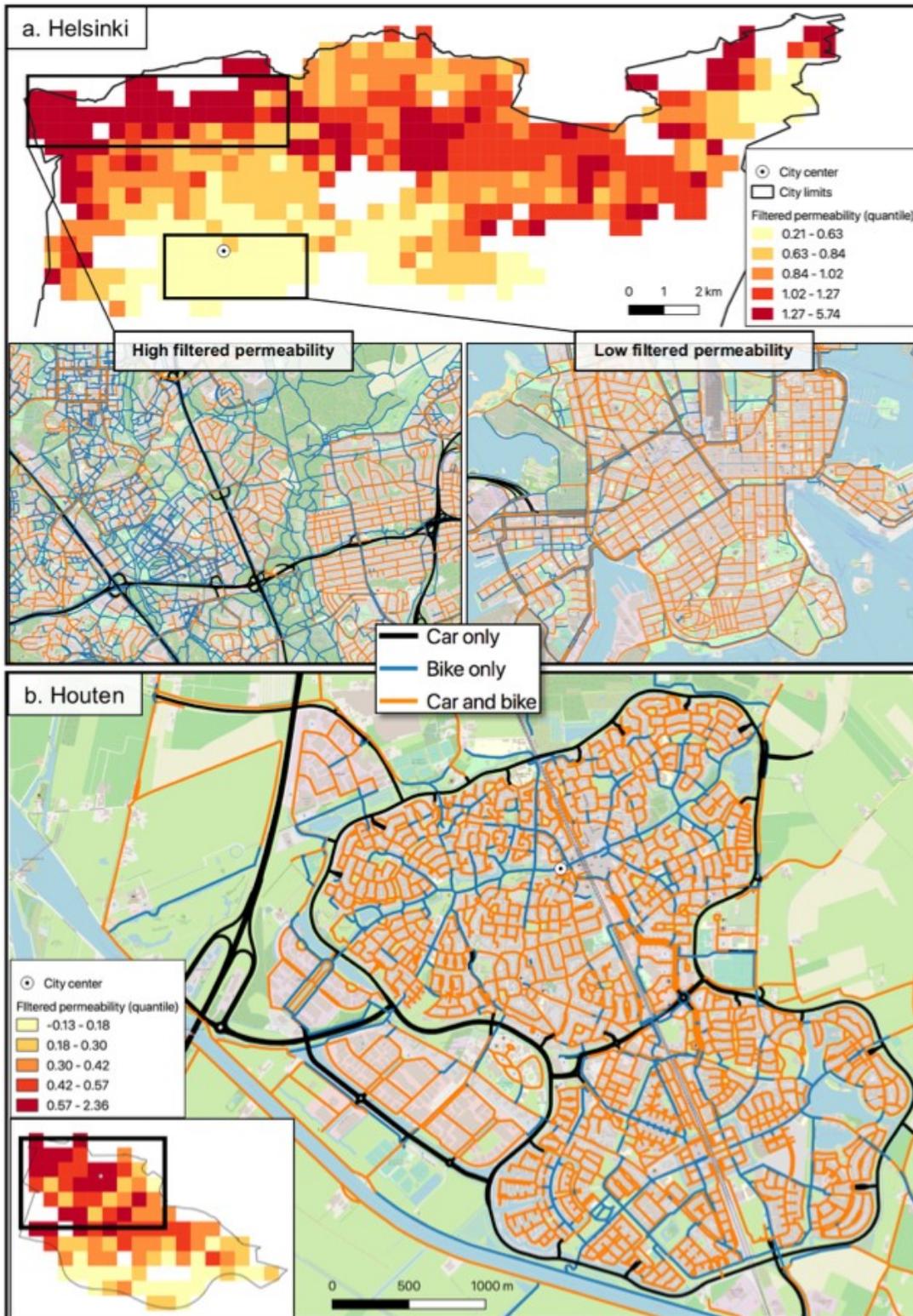


Figure 18 a, b. Intra-urban filtered permeability level and network analysis in (a) Helsinki and (b) Houten

3.5.2.2 Houten: a successful example of filtered permeability based on configuration and connectivity

The city of Houten is a case of particular interest since it was designed to prioritize cycling with strong emphasis on FP measures (Foletta 2011). Its FPw level is of 0.51 which places it in 5th position. On the other hand, the breakdown of the index per dimension showed that it is in 1st place in the dimensions of configuration and connectivity, but only in 15th position for the density dimension (Table 14, Annex 1).

The city of Houten is made up of 31 residential zones accessible to motor vehicles only by roads surrounding the city (Foletta 2011). Thus, to get from one zone to another, motorists are forced to use the peripheral routes, which eliminates transit traffic (Figure 18b). In addition, the speed limit is 30 km/h in the residential zones. Conversely, several cycling infrastructures directly connects the zones (Hilbers 2008). Traffic-easing measures were also set up to ensure cyclists' safety, such as interchanges or priority signage at intersections. Finally, most of the schools and important buildings are located along a standalone cycling path of about 3.3 km crossing the upper town from east to west.

For all these reasons, cycling is often the best way to reach desired destinations. In Houten, the modal share of bicycle use is 40% (Furth 2012). Furthermore, the level of motor vehicle use is considered low at 25% in comparison to similar cities (Foletta 2011). These results suggest that if the cycle network is judiciously connected and configured, it does not need to be dense to favour a high use of bicycles.

3.5.2.3 Phoenix: An example of a typically "American" unfiltered network

The results demonstrate that the transport networks of the eight cities selected from the United States are mostly not filtered. In fact, the FPw levels of these cities varies between 0.08 in Phoenix and 0.14 in San Francisco. This is explained by networks that are mostly grid-shaped and have few FP measures.

For Furth (2012), it is impossible to understand the approach to bicycle infrastructure planning in the United States without mentioning the theory of "*vehicular cycling*" (VC) promoted by Forester (1993). According to this theory, it is unsafe to separate cyclists from motor vehicle traffic except

along roads without intersections. When approaching an intersection, it would be preferable for a cyclist to be in the middle of road traffic in order to be seen by motorists. In addition, separated cycling infrastructures paths would not be desirable since they would aggravate cyclists' sense of inferiority towards motor vehicles. One of the only actions taken on behalf of cyclists is allowing them to ride with motor traffic (at most with road markings, such as bike lanes and shared lanes); the construction of cycling infrastructures being optional and hardly regulated at all when compared to numerous European countries. Although it's being increasingly abandoned today, the VC theory has found wide resonance throughout the USA and secondarily in Canada (Furth 2012).

The city of Phoenix is a prime example of an unfiltered network and influenced by the VC theory (Figure 19). In fact, it is laid out mainly in grid form and the only cycling infrastructures separated from motor traffic are situated along canals (which are undoubtedly more recreational than utilitarian). Despite this, Figure 19 allows us to assess the influence of one of the standalone paths (along the Grand Canal) on the FP level which is higher in the nearby cells.

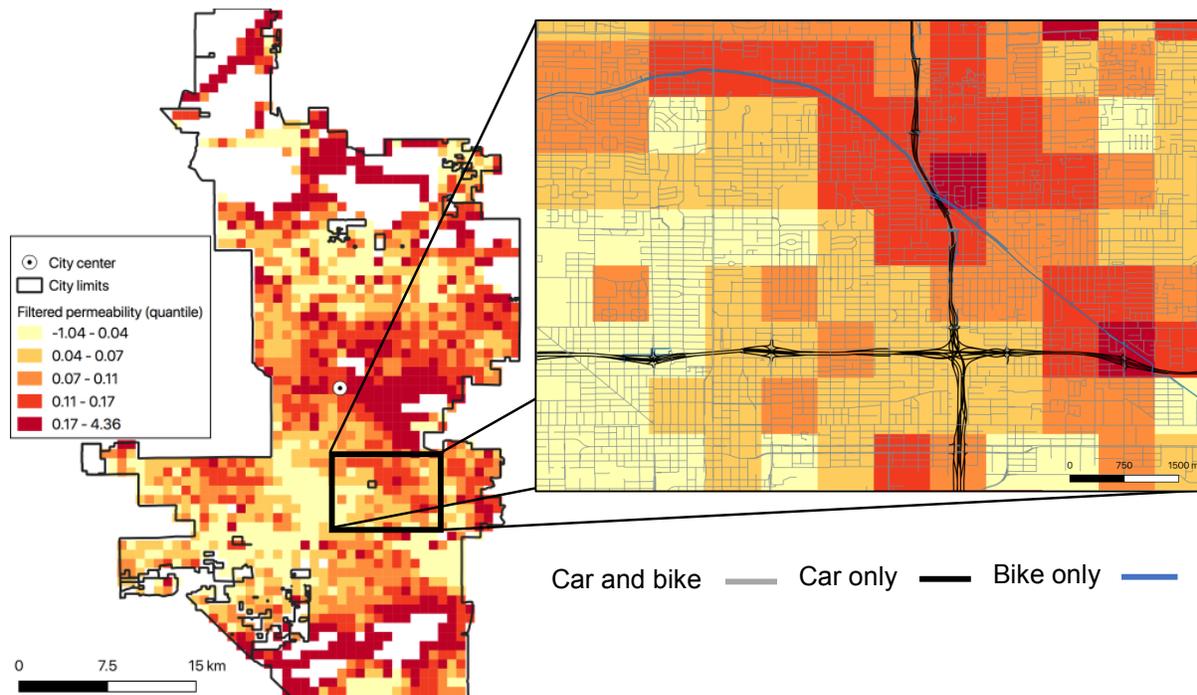


Figure 19. Intra-urban filtered permeability level and network analysis of the city of Phoenix

3.6 Discussion

3.6.1 Limits of the study

The main limits of the study are relative to the use of OSM data, the selection of cities and the construction of the FP index. Firstly, we couldn't retain African cities (due to incomplete OSM data) or Russian cities (due to differences in the calculation of routes). Secondly, like all selections of cities, it is questionable: it could have been based on different criteria and applied to a larger sample size. Moreover, differences between the selected cities in terms of urban environment, population, topography, culture, and socioeconomic status, to name a few, could make it difficult to compare their results. Nevertheless, we consider it appropriate to compare results between cities since the FP index is weighted by population. Indeed, this weighting allows cities to be comparable on a common basis by characterizing the level of FP in which their populations lives. Thirdly, the index is based on three dimensions (configuration, connectivity and density), to which it would have been possible to apply different weights. Sensitivity and uncertainty analyses could be conducted in further studies – namely with Sobol's index (Homma et Saltelli 1996 ; Saisana, Saltelli et Tarantola 2005 ; Sobol 1993) – to better understand the influence of each dimension on the FP index and thereby refine it. Also, one limitation of the FP index is that it takes little account of the comfort or "pleasantness" of a bicycle route, i.e. the perceived risk by cyclists. Therefore, whether it is a busy arterial or a quiet residential street, the index result will be unchanged. However, studies of network permeability typically do not include this aspect.

3.6.2 Potential influence of filtered permeability on mobility behaviours

The results unsurprisingly confirm what was put forward in the literature review: the FP level is higher in European cities than elsewhere in the world. These results suggest that the FP level has an influence on mobility behaviours and that a high FP level is necessary to support a high level of cycling. In fact, the modal share of cycling is 10% or more in several European countries (Germany, Finland, Sweden and Belgium) even reaching 18% in Denmark and 26% in the Netherlands (Buehler et Pucher 2012). Conversely, it is about 1% in the USA, Canada and Australia (Buehler et Pucher 2012).

Of course, FP is one of several factors influencing mobility behaviours and cannot explain on its own these differences in modal share. Among other factors to consider, let us cite, among others, accessibility (S. Handy 2005 ; Saelens et Handy 2008), population density (Cervero et Radisch 1995), land use (Jabareen 2006), safety (P. Schepers et al. 2013) and perceived risk (Broach, Dill et Gliebe 2012 ; Parkin, Wardman et Page 2007 ; Sanders 2015). Thus, to have a significant influence on mobility behaviours, it is essential to combine FP measures with these and other environmental factors known to encourage cycling (e.g. short trip distance, objective traffic danger and topography) (Fraser et Lock 2011).

3.6.3 Filtered permeability as a transport planning approach

The main interest of this article is to have highlighted a new approach to sustainable urban transport planning that maximizes the cycling potential of an area. Indeed, an underlying assumption of the FP concept is that to promote high levels of bicycle use, one must not only offer an effective network accessible by bicycle, but also make it more effective than that for the car. As a result, efforts must be made to improve the permeability gap between these two networks. It is therefore not optimal to develop only cycling infrastructures adjacent to roads. Even though they improve the comfort and safety of cyclists, the distance to be covered will remain the same. However, nowadays, the planning of the cycling network - especially in North American cities - is usually done in this way, which does not offer an advantage to cyclists over motorists. Another interest of the FP approach is that it broadens the spectrum of available planning tools to encourage cycling by not only relying on the construction of cycling infrastructures. One can also modify the existing network by adding physical obstacles, signs and one-way streets in strategic locations in order to offer cyclists a considerable advantage. The main advantage of FP is, therefore, the multitude of possible techniques for its implementation that allows it to be easily adapted to different types of urban environments. In addition, its impact on mobility behaviour is known to be rapid.

To maximize its influence on mobility behaviour on a territory, it would be suitable to favour an increase of the FP level in zones generating a lot of travelling, in other words, the one hosting high density of activities. In this manner, cycling will become a good transport option to reach several destinations of interest. In addition, a FP measure doesn't necessarily need a broad scope to be effective. In fact, a simple FP measure that is judiciously positioned can be just as advantageous for a cyclist as a long standalone path. Moreover, a section of a few metres can connect two points

which would be otherwise reachable by a more winding route. This section could be located between two cul-de-sacs, allowing one to cross a physical barrier (body of water, railways or highway) or a large block. It could also allow a cyclist to avoid a congested area or a dangerous intersection. As previously discussed, the city of Houten is a good example of the application of these principles. In fact, analyzing the FP level within this city tends to demonstrate that the network accessible to cyclists does not need to be dense to be effective: it can be, above all, well configured and connected.

The application of the FP principle does not involve a standardized approach. It is essential to have sound knowledge of the targeted area to define which strategies should be mobilized among those available. Certain territories have an urban morphology that is more compatible with certain FP measures. For example, a more winding road network can be opened up to cyclists by adding cycling infrastructures. Conversely, a grid-shaped network requires another approach since permeability is already higher for cars use and bicycles. In addition, the very high level of urbanization in cities sometimes makes it impossible to add new standalone paths. The solution to increase the FP level would then lie more in the implementation of other FP measures (signage, one-way, physical obstacles and traffic-easing measures) which do not change the general network shape, but rather what can be done with it.

Nonetheless, it is important not to overestimate the dissuasive effect that FP measures can have on the use of motor vehicles. In fact, it is easy for a motorist to travel the additional distance generated by these measures. Thus, the objective of any FP measure must be first and foremost to provide the most direct routes possible to cyclists and not to extend motor vehicle routes. Therefore, planning efforts should not neglect motor vehicles, but rather prioritize cyclists. Finally, despite the low cost and simplicity of implementing several FP measures, this remains a controversial approach due to restrictions applied to motorists. Nevertheless, if authorities truly want to encourage sustainable mobility, FP can be seen as an efficient tool to plan urban mobility by encouraging the use of bicycles rather than cars.

3.6.4 Filtered permeability index: a support tool for decision-making

Thus, in light of the findings in the article, planners would be well advised to think more carefully about their projects in terms of FP if they wish to help increase cycling and reduce car use. Any new development could be guided by the following question: does it provide cyclists an

advantage over motorists? If this is not the case, the desired modal shift is less likely to take place. Similarly, in order to develop the best cycling network possible and maximize bicycle use, the objectives targeted by the authorities must not only be numbered in kilometres of added cycling infrastructures, but essentially target an increase of the FP level.

In that regard, the FP index can be used as a decision-making tool to assess the efficiency of potential projects intended to favour cycling. In practical terms, at the scale of a city neighborhood, it is totally possible to test different scenarios: 1) by modifying the characteristics of certain network sections (one way, addition of a cycling infrastructure, etc.), 2) then by calculating the variability of the FP index between the current situation and the tested solution. This could help identify the most relevant project to prioritize by targeting the project with the greatest variability in the FP index. Furthermore, in a more exploratory approach, the index could be used to identify areas of a city with the lowest levels of FP where it would be most beneficial to propose a new development and/or network configuration. Finally, the FP index is relatively simple to calculate using OSM data, or better yet, from the local road networks that urban planners have at their disposal.

3.7 Conclusion

The main objective of the paper was to shed light on and operationalize for the first time the concept of filtered permeability (FP), an approach to transportation planning aimed at encouraging cycling. A FP index was constructed in order to compare the freedom of movement (permeability) offered by the network accessible by bicycle and that by car. It is based on the three dimensions that characterize a network: configuration, density and connectivity. To analyze the variability of the level of FP around the world, the index was calculated using OpenStreetMap (OSM) data in sixty cities grouped into five geographic regions: North America (n=16), Central and South America (n=8), Asia (n=10), Europe (n=21) and Oceania (n=5). The results show that the level of filtered permeability is about three times higher in Europe than in the other four geographical regions, where the results are found to be approximately the same on average. This allowed us to illustrate the factors contributing to the variability of FP in a city and throughout the world.

In line with recent works on accessibility to cycling networks from the perspective of environmental equity (Braun, Rodriguez et Gordon-Larsen 2019 ; Houde, Apparicio et Séguin 2018 ; Parker, Hinson et Porter 2021), it would be interesting to explore which population groups benefit most

from a high FP level. A longitudinal approach would also allow us to explore whether or not the rapid development of cycling networks in several major cities in the world has caused a significant increase in the FP level. For this purpose, the use of OSM data would again be interesting since they are available for different years.

CHAPITRE 4 : DISCUSSION

Ce projet de recherche avait comme objectifs d'exposer le concept de perméabilité filtrée et de caractériser son niveau dans plusieurs villes à travers le monde. Ce dernier chapitre propose une discussion plus approfondie des résultats comparativement à celle réalisée dans l'article scientifique.

4.1 Rappel et interprétation des principaux résultats

4.1.1 Rappel des résultats

Les résultats confirment en grande partie ce qui a été avancé dans les hypothèses, mais quelques nuances doivent être apportées. Tout d'abord, un constat s'impose. Quand il est question d'évaluer la perméabilité filtrée dans plusieurs villes à travers le monde, on distingue deux groupes : celles en Europe et celles du reste de la planète. En effet, le niveau moyen de perméabilité filtrée pondéré par la population ambiante est environ trois fois supérieur en Europe (0,44) que dans les quatre autres régions géographiques (Asie, Amérique centrale et du Sud, Amérique du Nord et Océanie) où les résultats sont semblables et varient entre 0,14 et 0,16.

Cela indique que les résultats ne sont pas, contrairement à l'hypothèse de départ, particulièrement plus faibles en Amérique du Nord (0,15) puisqu'on y retrouve des niveaux de perméabilité filtrée semblables à ceux mesurés dans le monde hors Europe. Par contre, les résultats montrent que l'hypothèse de départ est plutôt validée uniquement pour les villes états-uniennes. En effet, le niveau de perméabilité filtrée pondéré est en moyenne de 0,18 dans les villes canadiennes, de 0,19 dans la ville de Mexico et de 0,11 dans les villes états-uniennes. De plus, comme attendu, les villes situées en Océanie comportent un niveau de perméabilité filtrée pondéré (0,16) semblable à celui d'Amérique du Nord. Finalement, malgré une urbanisation ayant eu lieu bien plus tôt et donc qui a été moins basée sur l'automobile comparativement à l'Amérique du Nord et l'Océanie, les villes chinoises et japonaises n'obtiennent pas de plus hauts niveaux de perméabilité filtrée et ne sont en aucun cas comparables aux villes européennes.

4.1.2 Interprétation des résultats

À la lumière de ces résultats, une question émerge : qu'est-ce qui explique que les villes européennes comportent un niveau de perméabilité filtrée à ce point plus élevé que celui que l'on retrouve dans le reste du monde ? Bien que cette question puisse être le sujet d'une recherche à part entière comme de nombreux facteurs sont en jeu, quelques pistes d'explication peuvent être avancées.

Tout d'abord, il importe de préciser qu'aucune réglementation liée à la perméabilité filtrée n'a été relevée. Par contre, la principale différence entre l'Europe et le reste du monde est l'instauration de politiques pour favoriser et pérenniser la planification d'infrastructures cyclables (Furth 2012). Par exemple, aux Pays-Bas une réglementation exige qu'une séparation soit présente entre les infrastructures cyclables et routières sur les routes de plus de deux voies et sur celles dont la vitesse affichée est de 50 km/h et plus (Wegman et Aarts 2006). Cette séparation est justifiée par la grande vulnérabilité des cyclistes à l'égard des véhicules motorisés en raison de leurs différentiels de vitesse, de protection et de taille. Ainsi, la sécurité et le confort des usagers et usagères des infrastructures cyclables séparées sont augmentés, ce qui est connu pour favoriser la pratique du vélo (Winters et al. 2011 ; Sanders 2015). De plus, cette réglementation permet de contrecarrer la tendance naturelle des gouvernements à planifier des infrastructures cyclables de moindre qualité dont les coûts sont plus faibles (Furth 2012), telles les bandes cyclables et les voies partagées. Comme expliqué précédemment, étant donné le succès de l'approche du « *vehicular cycling* » (Forester 1993), c'est plutôt l'inverse en Amérique du Nord où la construction de voies cyclables est optionnelle et en aucun cas réglementée (Furth 2012).

Ainsi, notre hypothèse est que les politiques exigeant la mise en place d'infrastructures cyclables que l'on retrouve uniquement en Europe ont eu comme avantage indirect d'augmenter le niveau de perméabilité filtrée. Autrement dit, l'objectif des autorités n'est pas relatif à la perméabilité filtrée, mais vise plutôt l'augmentation de la sécurité et du confort des cyclistes. Le haut niveau de perméabilité filtrée qui caractérise le réseau de plusieurs villes d'Europe aurait donc été atteint sans y aspirer directement. En effet, la perméabilité filtrée est un nouveau concept peu connu et qui intègre progressivement le lexique de la planification des transports. Malgré tout, il s'agit aussi peut-être d'une approche que les responsables de la planification des transports en Europe ont intuitivement été plus enclins à utiliser étant donné une plus grande sensibilité à la pratique du vélo.

De plus, les résultats suggèrent que le niveau de perméabilité filtrée a une influence sur les comportements de mobilité et qu'un haut niveau est nécessaire pour soutenir une forte utilisation du vélo. En effet, la part modale du vélo est de plus de 10% dans plusieurs pays européens (Allemagne, Finlande, Suède et Belgique) atteignant même 18% au Danemark 26% et aux Pays-Bas (Buehler et Pucher 2012). À l'inverse, elle est d'environ 1% aux États-Unis, au Canada et en Australie (Buehler et Pucher 2012). Bien sûr, la perméabilité filtrée n'est qu'un des multiples facteurs influençant les comportements de mobilité et ne peut en aucun cas expliquer à elle seule ces différences de part modale. En effet, plusieurs autres facteurs, principalement des caractéristiques de l'environnement urbain, sont connus pour influencer significativement le choix du mode de transport (P. G. Newman et Kenworthy 1989 ; P. W. Newman et Kenworthy 1996 ; UN Habitat 2013a ; Knoflacher, Rode et Tiwari 2008 ; S. Lee et Lee 2014). Ce sera l'objet de la prochaine section. Ainsi, c'est l'effet de ces caractéristiques de l'environnement urbain combiné avec un haut niveau de perméabilité filtrée qui peuvent expliquer en bonne partie la forte utilisation du vélo en Europe.

4.2 Influence de l'environnement urbain sur le choix modal

4.2.1 L'accessibilité comme concept clé

De nombreuses études ont examiné le lien entre l'environnement urbain et le choix modal (Saelens, Sallis et Frank 2003 ; Cervero et Duncan 2003 ; Ewing et Cervero 2001 ; Jabareen 2006). L'environnement urbain y est défini comme tout ce qui a été construit par les activités humaines (Saelens et Handy 2008). Dans ces études, l'accessibilité est souvent ciblée comme la variable ayant la plus grande influence sur le choix modal.

L'accessibilité se rapporte à la capacité des individus d'atteindre les destinations désirées (Geurs et Van Wee 2004). Il s'agit donc d'évaluer l'efficacité d'un système de transport à permettre à ses utilisateurs de rejoindre les différentes activités sur le territoire qu'il dessert (Bertolini, Le Clercq et Kapoen 2005 ; Kwok et Yeh 2004). Dans les études sur le sujet, l'accessibilité est habituellement représentée par une variable qualifiant la distance vers certains types d'activités (école, commerce, hôpital, etc.) ou par le nombre d'activités accessibles pour une distance de parcours donnée (S. Handy 2005). Cette variable est celle qui offre le plus de constance dans l'intensité de son association avec la pratique du vélo et de la marche (S. Handy 2005 ; Saelens et Handy 2008 ; Saelens, Sallis et Frank 2003). En guise d'exemple, dans une analyse de 13

synthèses et de 29 articles, Saelens et Handy (2008) ont conclu que ce sont les mesures d'accessibilité qui ont le plus grand pouvoir explicatif sur le choix modal. De plus, S. Handy (1993) a constaté que les personnes habitant des territoires caractérisés par un haut niveau d'accessibilité parcourent 40% moins de distance pour aller magasiner que ceux vivant dans des milieux avec un faible niveau d'accessibilité. Ainsi et sans surprise, ceci implique que la mobilité active est privilégiée plus la distance à parcourir est courte et plus le nombre de destinations potentielles à proximité est élevé. Une augmentation du niveau d'accessibilité figure donc parmi les moyens les plus efficaces pour favoriser un transfert modal de l'automobile vers les modes actifs (Cervero et Radisch 1995 ; S. Handy, Cao et Mokhtarian 2005 ; W. E. Marshall et Garrick 2012).

Ainsi, l'accessibilité est majoritairement fonction des systèmes de transport et de l'utilisation du sol (Bertolini, Le Clercq et Kapoen 2005). En effet, selon les travaux de Wegener et Fürst (2004), un cycle de rétroaction existe entre ces deux dimensions, tel qu'illustré à la figure 20. Ce cycle de rétroaction indique de façon sommaire (à gauche) et ensuite de façon détaillée (à droite) comment les systèmes de transport et l'utilisation du sol influencent l'accessibilité et s'influencent mutuellement. Ceux-ci façonnent la façon par laquelle un territoire se développe et que l'environnement urbain s'y construit, ce qui à son tour influence les activités que la population effectue ainsi que leurs comportements de mobilité. En effet, l'accessibilité et l'efficacité des systèmes de transport influencent la localisation des opportunités (commerces, industries, logements, etc.) et ces variables influencent la distance à parcourir, la fréquence des déplacements et le mode utilisé (Pelletier-Grenier 2018).

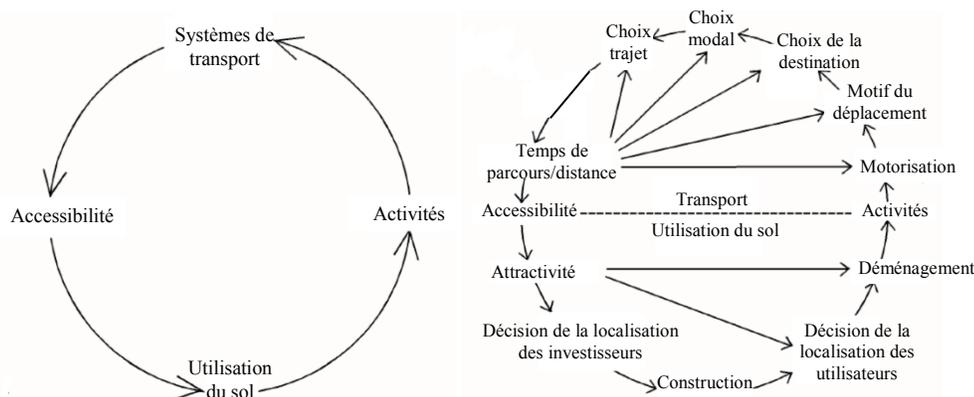


Figure 20 : Cycle de rétroaction transport-utilisation du sol

Source : Traduit et adapté de Wegener (2004, figure 1).

4.2.2 Caractéristiques influençant le niveau d'accessibilité

Les principales caractéristiques de l'environnement urbain influençant le niveau d'accessibilité ont été identifiées, et ce, principalement à l'aide du travail de Jabareen (2006). Il s'agit de la densité, de la compacité et de la mixité fonctionnelle.

La densité exprime l'intensité de l'occupation d'un territoire par l'humain et se mesure habituellement en logement ou personne par superficie. Il est aujourd'hui communément admis que des densités élevées fournissent un milieu urbain relativement défavorable à l'automobile et à l'inverse encouragent l'usage des modes actifs (Pouyanne 2004). Par exemple, Holtzclaw (1994) a démontré que la distance parcourue en automobile par ménage chute d'un quart lorsque la densité double, et ce, lorsque plusieurs facteurs sont contrôlés. Clifton et Dill (2005) ont également observé qu'un plus grand nombre de déplacements est effectué à pied lorsque la densité est d'au moins 5000 logements par mile carré (2,6 km²). À l'inverse, sous certains seuils de densité, soit 35 personnes/hectare selon P. Newman et Kenworthy (2006) ou 40 personnes/hectare selon Banister (2008), la dépendance à l'automobile est une réalité difficilement altérable. Il a aussi été démontré qu'une grande densité permet de réduire la consommation d'énergie pour le transport par habitant.e. Dans leur livre *Cities and automobile dependence : An international sourcebook*, P. G. Newman et Kenworthy (1989) ont démontré à partir d'une comparaison de 32 grandes villes du monde qu'une forte relation inverse existe entre la densité urbaine et la consommation d'énergie dans le secteur du transport. Cette relation a par la suite été démontrée à de nombreuses reprises (Pouyanne 2004). Par exemple, selon S. Lee et Lee (2014), doubler la densité de population permet de réduire de 48% les émissions de CO₂ liées au transport.

La compacité réfère à une occupation du territoire qui limite les vides et les discontinuités. Elle consiste en grande partie à favoriser une urbanisation adjacente au cadre bâti déjà existant afin de limiter au maximum l'étalement urbain (Wheeler 2002). L'objectif est de créer des milieux de vie denses et de réduire les distances de parcours pour soutenir les déplacements en modes actifs (Jabareen 2006).

La mixité fonctionnelle implique de favoriser une diversité dans les usages du sol (résidentiel, commercial, service, espace vert, etc.); l'objectif étant de mettre en place une proximité entre les différentes activités sur un territoire (Jabareen 2006). Ainsi, tout comme avec la compacité les distances de parcours sont réduites ce qui encourage la mobilité active. En effet, plusieurs études

ont démontré qu'un haut niveau de mixité fonctionnelle est associé à une plus grande part modale de marche et de vélo (Hoehner et al. 2005 ; C. Lee et Moudon 2006 ; Rutt et Coleman 2005 ; De Bourdeaudhuij et al. 2005). De plus, une mixité peut également être visée dans les composantes de l'environnement urbain, tel que dans l'architecture, les bâtiments et les types de logements. Une diversité dans les caractéristiques de la population est également encouragée, soit en matière d'âge, d'origine ethnique ou de revenu. Ceci permet de créer un milieu de vie dynamique, agréable et attractif, ce qui tend à favoriser les interactions et le transport actif Jacobs (1961).

En somme, une densité résidentielle élevée, une urbanisation compacte et une utilisation du sol diversifiée permettent de maximiser le niveau d'accessibilité des différentes activités sur un territoire (Babalik-Sutcliffe 2013 ; Burton 2000). Ce faisant, les distances que devra parcourir la population pour répondre à leurs besoins sont courtes, ce qui favorise l'utilisation du vélo et réduit celle de l'automobile (S. L. Handy 2002). Le potentiel cycliste est alors élevé puisque plusieurs déplacements sont envisageables en vélo. Autrement dit, plus le niveau d'accessibilité d'un territoire est élevé, plus la demande latente pour des déplacements à vélo est grande. Il importe alors de créer un environnement urbain le plus propice à la pratique du vélo possible pour que cette demande se concrétise. Des mesures de perméabilité filtrée peuvent être en ce sens une façon efficace d'y parvenir. Il s'agit du sujet de la section 4.3 (*La perméabilité filtrée comme approche innovante en planification des transports*).

4.2.3 Formes urbaines durables

Trois modèles de forme urbaine durable intégrant de différentes façons les trois caractéristiques venant d'être présentées ont été identifiés. Il s'agit du développement néo-traditionnel, du confinement urbain et de la ville compacte (Jabareen 2006).

Le modèle du développement néo-traditionnel se rapporte principalement au mouvement du nouvel urbanisme. Il intègre les trois caractéristiques venant d'être présentées. Parmi les solutions privilégiées, mentionnons notamment la densification urbaine, la mise en place de *transit-oriented development* (TOD) et la limitation de l'étalement urbain par la promotion de milieux de vie compacts et caractérisés par une forte mixité dans l'utilisation du sol (Banister 2012). Ces solutions permettent d'offrir des environnements favorisant fortement le vélo grâce à des trajets plus directs ainsi qu'à des routes moins bruyantes et plus accueillantes (Calthorpe 1993). De plus,

selon Arrington et Cervero (2008) la mise en place d'un TOD peut permettre de réduire l'utilisation de l'automobile de moitié et permettre aux ménages d'économiser environ 20% de leur revenu.

Le modèle du confinement urbain vise principalement à empêcher l'étalement en imposant des limites géographiques précises dont la croissance urbaine ne peut franchir (Jabareen 2006). Ceci permet également de préserver les zones rurales et naturelles. Des initiatives de densification, de mixité fonctionnelle et de compacité y sont aussi encouragées (Pendall, Martin et Fulton 2002). Par contre, l'objectif est avant tout de restreindre l'expansion de la périphérie urbaine plutôt que de supporter une forte densification à l'intérieur de celle-ci. Pour ce faire, trois outils sont particulièrement utilisés. Premièrement, il y a la mise en place de ceintures vertes (*greenbelts*) autour de zones urbanisées, soit d'espaces protégées dans lesquelles l'urbanisation est prohibée ou fortement contrôlée. Deuxièmement, il y a la désignation légale de frontières de croissance urbaine (*urban growth boundaries*) à l'extérieur desquelles la construction est interdite (Staley, Edgens et Mildner 1999). Troisièmement, il y a la création de zones de services urbains dont seuls les résident.e.s locaux peuvent profiter. Ce modèle se rapporte aussi à des initiatives qualifiées de *smart growth*.

Le troisième modèle est celui de la ville compacte. Il s'agit sûrement du modèle le plus étudié et apprécié par des chercheurs et chercheuses (Babalik-Sutcliffe 2013 ; S. Lee et Lee 2014 ; Williams 2017). En effet, si l'étalement est présenté comme une « forme dispendieuse » (Ewing 1997), alors la ville compacte s'affirme à l'opposé comme une forme économe et comme un idéal de planification (Pouyanne 2004). Essentiellement, il s'agit de mettre en place une haute densité de population ainsi qu'un haut niveau de mixité fonctionnelle à l'intérieur de frontières urbaines clairement définies. La ville compacte se rapproche donc à la fois au modèle du développement néo-traditionnel et du confinement urbain. Ses avantages sont nombreux et se déclinent en trois catégories distinctes. Tout d'abord, elle consomme moins d'espace en l'utilisant plus efficacement et permet donc une économie de sols non urbanisés. Ensuite, la ville compacte permet de diminuer les coûts d'urbanisation en concentrant les infrastructures et services ce qui réduit le coût par habitant.e. Finalement, tel que précisé par Pouyanne (2004, 7) « en termes de mobilité, l'évidence empirique en faveur de la ville compacte semble solidement établie ». Elle permet de réduire l'utilisation de l'automobile et favoriser celle des modes actifs et du transport en commun en diminuant les distances à parcourir.

Ainsi, dans ces trois modèles de forme urbaine l'objectif premier relatif à la mobilité est de réduire les distances à parcourir pour favoriser le recours à la mobilité active. Par contre, dans aucune

de ces formes urbaines cet objectif ne se décline directement en termes de perméabilité filtrée. Ainsi, en l'absence de mesure de perméabilité filtrée, la liberté de mouvement sera la même pour tous les modes. Le niveau de perméabilité filtrée peut donc être faible malgré de hauts niveaux de densité, compacité et mixité fonctionnelle.

4.2.4 Retour sur les résultats

Cette section a pour but de revisiter les résultats en y intégrant les éléments relatifs à l'influence de l'environnement urbain sur le choix modal. Comme présenté dans la section 1.2 (*Mobilité urbaine*), l'arrivée massive de l'automobile dans les années 1920 a engendré de nombreux changements dans la forme urbaine de plusieurs villes à travers le monde, et ce, surtout en Amérique du Nord et en Océanie. La plus grande conséquence y a été l'étalement urbain qui a occasionné une baisse de la mixité fonctionnelle et de la densité de population dans les nouvelles zones urbanisées situées en périphérie des quartiers centraux. En effet, il y a eu une diminution de la mixité des types d'activités sur le territoire par la mise en place de grandes zones monofonctionnelles, à caractère résidentiel, commercial ou industriel. Pour ce qui est de la baisse dans la densité, elle a été observée par Angel et al. (2011) qui ont conclu que la plupart des villes ont atteint leur pic de densité il y a environ 120 ans et qu'elle est en déclin depuis. La densité dans les villes était d'environ 430 personnes/hectare au début du 20^e siècle et de 100 personnes/hectare en l'an 2000. De plus, cette diminution de la densité se serait accentuée dans les trente dernières années. La Banque Mondiale a estimé qu'entre 1990 et 2000, la taille des villes des pays développés a augmenté de 30%, malgré une croissance de la population six fois moins importante (Banque Mondiale 2014). Ainsi, les villes présentant ces dynamiques ont aujourd'hui à différent degré une forme urbaine allant à l'encontre des principes clés venant d'être présentés (densité, compacité et mixité fonctionnelle), ce qui en retour n'encourage pas l'utilisation du vélo dû à de plus grandes distances à parcourir (Williams 2017). C'est en grande partie ce qui peut expliquer les faibles parts modales de vélo que l'on retrouve en Amérique du Nord et en Océanie. De plus, le niveau de perméabilité filtrée y est faible ce qui tend à favoriser l'usage de l'automobile.

Par contre, de tels changements n'ont pas eu lieu dans diverses villes, notamment en Europe, où la faible quantité de terres disponibles ne permettaient pas un étalement important (Rodrigue 2016). Ainsi, ceci suggère que les villes européennes sélectionnées pour l'étude ont aujourd'hui des niveaux de densité, compacité et mixité fonctionnelle favorables à la pratique du vélo. Elles

ont donc des formes urbaines se rapprochant de celles énoncées dans la dernière section 4.2.3 (*Formes urbaines durables*). Ceci tend à démontrer que c'est en combinant de telles formes urbaines avec un haut niveau de perméabilité filtrée qu'une forte utilisation du vélo peut être atteinte. C'est donc cet effet couplé qui expliquerait que l'on retrouve en Europe les parts modales de vélo les plus élevés au monde.

4.2.5 Changement dans la perméabilité des réseaux

Les changements dans la morphologie des villes au fil du temps ont également impacté la perméabilité des réseaux de transport des villes. La grille de rue quadrillée traditionnelle (haute perméabilité pour tous les modes) a été progressivement délaissée en faveur d'une trame plus sinueuse et curviligne comportant des culs-de-sac (faible perméabilité pour tous les modes) (Randall et Baetz 2001). Cette transition dans la forme des nouveaux réseaux de rues a été observée dans la majorité des pays dans le monde. En effet, selon le travail de C. Barrington-Leigh et Millard-Ball (2020) qui ont évalué la connectivité des réseaux de rue sur l'ensemble de la planète à travers le temps, il y a une tendance mondiale à la « déconnectivité » des réseaux routiers. Il est à noter que les voies cyclables et piétonnes ont été incluses dans leur analyse. Ils ont démontré que les réseaux construits depuis 1975 sont moins bien connectés qu'auparavant dans 90% des 134 pays les plus peuplés. Cela démontre sans surprise que la perméabilité tend à diminuer nettement d'un gradient allant des quartiers centraux (habituellement sous forme de grille) vers les secteurs périphériques des villes (avec une trame de rues plus sinueuse). Toujours selon ces travaux, bien que cette tendance soit moins accentuée au Canada qu'aux États-Unis, les résultats révèlent par exemple que le centre-ville de la ville de Montréal est bien connecté et que la connectivité est plus faible en périphérie. En guise d'illustration, la figure suivante présente le réseau routier du centre-ville de la ville de Montréal et celui d'une zone de l'arrondissement de Pierrefonds-Roxboro.



Figure 21. Réseau routier du centre-ville de Montréal (à gauche) et de l'arrondissement de Pierrefonds-Roxboro (à droite)

Source : cartes produites avec QGIS.

Cette tendance à la « déconnectivité » est problématique pour la durabilité des villes puisqu'il a été démontré qu'un réseau bien connecté peut permettre de favoriser le transport actif tout en réduisant l'utilisation de l'automobile, et ce, en diminuant la distance à parcourir (Dill 2004 ; Ellis et al. 2016 ; Randall et Baetz 2001 ; Berrigan, Pickle et Dill 2010 ; C. Barrington-Leigh et Millard-Ball 2020). Malgré tout, il importe de préciser qu'un haut niveau de connectivité tel que mesuré dans le travail de C. Barrington-Leigh et Millard-Ball (2020) implique en aucun cas un haut niveau de perméabilité filtrée, et inversement. En effet, à la différence de l'indice de perméabilité filtrée, aucune différenciation n'a été faite entre le réseau accessible à vélo et en automobile dans leur étude. De plus, les voies piétonnes ont été incluses.

En guise d'exemple, les résultats indiquent une baisse de la connectivité du réseau de rue au Danemark. Par contre, « (...) des voies cyclables et piétonnes semblent souvent intégrées dans les nouveaux développements (...). Par exemple, des culs-de-sac adjacents (...) sont normalement reliés par une piste cyclable et piétonne [traduction libre]. » (C. Barrington-Leigh et Millard-Ball 2020, 4). Ainsi, malgré une baisse générale de la connectivité du réseau de rue, le niveau de perméabilité filtrée semble être élevé dans les nouveaux développements au Danemark grâce à la présence de multiples pistes cyclables hors rue et à une faible connectivité du réseau accessible à l'automobile. Cette description se rapproche de celle d'un réseau que l'on qualifie de *fused grid* (figure 9) et qui a été présenté comme un bon exemple de perméabilité filtrée à la section 1.4.5 (*Impact sur la pratique du vélo*). Inversement, en l'absence de mesure de perméabilité filtrée, le niveau de perméabilité filtrée sera nul, et ce, peu importe si la connectivité générale du réseau est faible ou élevée.

4.3 La perméabilité filtrée comme approche innovante en planification des transports

Force est de constater que l'environnement urbain d'aujourd'hui est le fruit de nombreux efforts de planification effectués à différentes époques, et ce, lorsque les objectifs n'étaient pas toujours les mêmes. Dans une ville se chevauchent et cohabitent plusieurs formes d'urbanisation comme précédemment discutées. De plus, une fois construites les routes ne sont presque jamais déplacées puisqu'il est bien souvent impensable de revoir leurs tracés (Fradkin 2005). Ainsi, tel que précisé par Ozbil, Peponis et Stone (2011), un réseau de transport constitue le cadre à long terme dans lequel l'utilisation du sol change avec le temps. Le réseau de transport d'une ville est ainsi certainement son élément le plus permanent et donc celui pour lequel les décisions du passé résonnent le plus encore aujourd'hui. Une question générale s'impose alors : comment faire pour planifier un système de transport durable si sa forme est peu compatible avec cet objectif et qu'il n'est pas possible de la modifier? Cet enjeu fait partie des raisons faisant du transport un des secteurs où il est le plus difficile d'atteindre des réductions dans la consommation d'énergie et dans les émissions de GES (Hickman, Hall et Banister 2013 ; Banister 2012 ; Nicholas Stern 2007 ; Kahn Ribeiro et al. 2007). Malgré tout, dans le but de tendre vers une mobilité urbaine plus durable, une des solutions envisageables est de modifier l'usage que l'on fait du réseau plutôt que sa forme, et il s'avère que la perméabilité filtrée peut être un outil innovant pour y parvenir. Par contre, il est nécessaire d'adapter la stratégie aux caractéristiques de l'environnement urbain.

4.3.1 Adapter la stratégie en fonction de l'environnement urbain

L'application du principe de perméabilité filtrée n'implique pas une approche standardisée. Il est essentiel d'avoir une bonne connaissance des caractéristiques du territoire visé, soit principalement celles énoncées dans les dernières sections. Une telle analyse permet de définir les meilleures stratégies à mobiliser parmi celles disponibles, et ce, puisque certains territoires ont des caractéristiques plus compatibles avec certaines mesures de perméabilité filtrée. Prenons en exemple les deux cas illustrés précédemment à la figure 21 et qui ont l'avantage de représenter deux extrêmes.

Dans le premier cas, soit celui d'un centre-ville ou plus généralement d'une zone dans un quartier central, le réseau est principalement sous forme de grille. Sa perméabilité est élevée et

sensiblement la même pour l'automobile et le vélo. De plus, la très forte urbanisation rend complexe l'ajout de nouvelles voies cyclables hors rue, soit la première mesure de perméabilité filtrée (voir le tableau 2 au besoin). La solution pour augmenter le niveau de perméabilité filtrée réside alors davantage dans l'implantation des autres mesures de perméabilité filtrée (signalisation, sens unique, obstacles physiques et mesures d'apaisement de la circulation). Celles-ci ne modifient pas la forme générale du réseau, mais permettent de contrôler les flux de déplacements dans le but d'offrir un avantage aux cyclistes. Par contre et comme discuté plus tôt, en raison des restrictions appliquées à la conduite automobile elles sont habituellement controversées et donc délicates à mettre en place. Malgré tout, il s'agit du type de zone où les caractéristiques de l'environnement urbain sont parmi les plus favorables à la pratique du vélo. En effet, le niveau d'accessibilité y est élevé grâce à une forte densité de population, compacité et mixité fonctionnelle. De cette façon, le potentiel cycliste y est élevé. Ainsi, c'est là où une mesure de perméabilité filtrée peut avoir l'impact le plus significatif sur les comportements de mobilité en favorisant un important transfert modal de l'automobile vers le vélo.

À l'inverse, le second cas (secteur situé en périphérie des quartiers centraux) nécessite une tout autre approche. Dans un tel secteur, le réseau est habituellement plus sinueux et la perméabilité y est faible tant pour l'automobile que pour le vélo. Par contre, davantage d'espace y est généralement disponible comparativement aux quartiers centraux. Ainsi, la meilleure solution pour augmenter le niveau de perméabilité filtrée est d'accroître la liberté de mouvement des cyclistes en désenclavant le réseau par l'ajout d'infrastructures cyclables en site propre. Par contre, on retrouve dans ces secteurs un plus faible potentiel cycliste dû à un niveau plus bas d'accessibilité. Le tableau suivant synthétise les points venant d'être présentés.

Tableau 13. Exemples d'approche à privilégier selon le type d'environnement urbain

Caractéristiques	Cas 1 : quartiers centraux	Cas 2 : quartiers périphériques
Type de réseau	Grille	Sinueux
Perméabilité réseau automobile	Élevé	Faible
Perméabilité réseau cyclable	Élevé	Faible
Potentiel cycliste	Élevé	Faible
Mesure de perméabilité filtrée à privilégier	Signalisation, sens unique, obstacle et mesures d'apaisement de la circulation	Ajout d'infrastructures cyclables hors rue
Impact potentiel des mesures sur la mobilité	Élevé	Faible

Bien sûr, ces deux cas ne sont que des exemples. L'objectif du tableau est avant tout de démontrer l'importance d'adapter la stratégie en fonction des caractéristiques du territoire ciblé,

et ce, en illustrant deux cas aux antipodes. De plus, ces exemples ont permis de souligner qu'il importe de privilégier avant tout une augmentation du niveau de perméabilité filtrée dans les zones générant beaucoup de déplacements, soit celles accueillant de fortes densités d'activités. De la sorte, le vélo se présentera comme une bonne option de transport pour atteindre plusieurs destinations d'intérêt. Dit autrement, une mesure de perméabilité filtrée aura un effet maximal si elle permet d'améliorer l'accessibilité à vélo par rapport à celle en automobile des destinations attirant le plus de déplacements sur un territoire. On pourrait alors parler « d'accessibilité filtrée ».

Finalement, autre élément important à considérer, une mesure de perméabilité filtrée n'a pas nécessairement besoin d'être de grande envergure pour être efficace. En effet, une simple mesure de perméabilité filtrée judicieusement positionnée peut-être tout aussi avantageuse pour un.e cycliste qu'une longue voie cyclable hors rue. D'une part, comme dans le cas 2 du tableau 13, un tronçon de quelques mètres peut relier deux points qui seraient atteignables autrement par un chemin plus sinueux. Ce tronçon pourrait se situer entre deux culs-de-sac, au-dessus d'une barrière physique (cours d'eau, chemin de fer ou autoroute) ou un îlot de grande taille. Elle pourrait également permettre à un.e cycliste d'éviter un tronçon congestionné ou une intersection dangereuse. D'autre part, comme dans le cas 1 du tableau 13, des obstacles physiques, de la signalisation ou des sens uniques peuvent permettre de filtrer la circulation motorisée à des endroits stratégiques dans le but d'offrir aux cyclistes un avantage considérable.

Tel que discuté précédemment, la ville de Houten est un bon exemple de l'application de ces principes. En effet, l'analyse du niveau de perméabilité filtrée au sein de cette ville suggère que le réseau accessible à vélo n'a pas besoin d'être dense pour être efficace : il peut être avant tout bien configuré et connecté. Finalement, la ville de Houten démontre également un autre aspect primordial d'une planification réussie visant à favoriser la pratique du vélo, soit d'intégrer l'accessibilité.

4.3.2 L'indice de perméabilité filtrée : un outil d'aide à la décision

À la lumière des résultats avancés dans l'article, les responsables de la planification des transports auraient tout intérêt à réfléchir davantage leurs projets en termes de perméabilité filtrée s'ils visent à favoriser une plus forte pratique du vélo et une réduction de celle de l'automobile. Rappelons que l'hypothèse sous-jacente au concept de perméabilité filtrée est que pour favoriser une forte utilisation du vélo, il ne faut pas uniquement que le réseau accessible à vélo soit efficace,

mais surtout qu'il soit plus efficace que celui pour l'automobile. C'est l'écart de perméabilité entre ces deux réseaux qu'il faut s'efforcer d'améliorer. Tout nouvel aménagement pourrait alors être guidé par la question suivante :

L'aménagement proposé permet-il d'offrir un avantage au vélo par rapport à l'automobile?

Si ce n'est pas ou peu le cas, le transfert modal souhaité risque de ne pas ou peu se concrétiser. Dans cet ordre d'idées, il n'est donc pas optimal d'aménager seulement des infrastructures cyclables adjacentes aux routes. Bien qu'elles améliorent le confort et la sécurité des cyclistes, la distance à parcourir restera sensiblement la même pour les deux modes. Cependant, la planification du réseau cyclable dans les villes se fait aujourd'hui majoritairement de cette manière, et ce, surtout en Amérique du Nord, ce qui n'offre en retour aucun réel avantage aux cyclistes. Dans la même veine, dans le but de développer le meilleur réseau cyclable possible, les objectifs visés par les autorités ne devraient pas être chiffrés uniquement en kilomètres d'infrastructures cyclables ajoutés, mais surtout viser une augmentation du niveau de perméabilité filtrée.

En ce sens, nous sommes d'avis que l'indice de perméabilité filtrée peut servir d'outil d'aide à la décision pour évaluer l'efficacité de projets d'aménagements potentiels visant à favoriser la pratique du vélo. Concrètement, à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, il est tout à fait possible d'analyser différents projets de planification, et ce, en deux étapes :

1. Dans un outil de calcul de trajet, modifier le réseau de la façon proposée par chacun des projets (sens unique, ajout d'une piste cyclable, etc.). L'indice peut être calculé à partir des données OSM, ou mieux encore à partir des réseaux routiers locaux dont disposent les planificateurs urbains.
2. Calculer la variabilité de l'indice de perméabilité filtrée entre la situation actuelle et celle des projets analysés.

De la sorte, ceci peut aider à identifier le projet qui serait le plus pertinent à prioriser en ciblant celui où la variabilité de l'indice de perméabilité filtrée est la plus grande. Aussi, dans une démarche plus exploratoire, l'indice peut servir à identifier les secteurs d'une ville avec les plus faibles niveaux de perméabilité filtrée, soit là où il serait le plus bénéfique de proposer un nouvel aménagement et/ou une nouvelle configuration du réseau. Les figures de l'annexe 2 sont de bons

exemples de cette possibilité. Ainsi, l'indice de perméabilité filtrée peut certainement contribuer à une planification plus durable des systèmes de transport. En effet, tel que l'énoncent Bhat et al. (2000), il y a aujourd'hui un réel besoin d'outils pour évaluer l'efficacité des projets de transports, et ce, dû au contexte d'augmentation de la congestion et de la pollution, d'une diminution de l'espace disponible et des investissements.

4.3.3 Principaux intérêts de l'approche de perméabilité filtrée

Un intérêt majeur de l'approche de perméabilité filtrée est à notre avis qu'elle permet de maximiser le potentiel cycliste d'une zone, ce potentiel étant fonction des caractéristiques de l'environnement urbain tel que discuté à la section 4.2. Autrement dit, il est estimé qu'un haut niveau de perméabilité filtrée permet d'atteindre le plein potentiel cycliste d'une zone en répondant le plus efficacement possible à la demande pour des déplacements en vélo. À l'inverse, lorsqu'aucune mesure de perméabilité filtrée ne permet d'encourager la pratique du vélo, cette demande ne peut se manifester. Il y a alors une « perte » du potentiel cycliste. Un autre intérêt de l'approche de perméabilité filtrée est qu'elle élargit l'éventail des outils de planification en ne s'appuyant pas uniquement sur la construction d'infrastructures cyclables. Le réseau existant peut également être modifié par l'ajout d'obstacles physiques, de signalisation ou en modifiant le sens de la circulation d'offrir aux cyclistes des trajets plus courts qu'en automobile. De plus, ces mesures sont simples à mettre en place et les coûts associés sont plutôt faibles.

Ainsi, un grand avantage de l'approche de perméabilité filtrée est la multitude de techniques possibles pour sa mise en œuvre, ce qui permet de l'adapter facilement à différents types d'environnements urbains. De plus, la zone visée peut être à différentes échelles, que ce soit au niveau d'une rue, d'un îlot urbain, d'un quartier ou d'une ville. Finalement, l'impact des mesures de perméabilité filtrée sur les comportements de mobilité est connu pour être rapide (Aldred, Croft et Goodman 2019).

Malgré tout, il est important de ne pas surestimer l'effet dissuasif que les mesures de perméabilité filtrée peuvent avoir sur l'utilisation de l'automobile. En effet, il est facile de parcourir la distance supplémentaire générée par ces mesures pour un.e automobiliste. Ainsi, l'objectif de toute mesure de perméabilité filtrée doit être avant tout de fournir les meilleures routes possibles aux cyclistes et non d'allonger les trajets en automobile. L'effort de planification ne doit donc pas négliger l'automobile, mais plutôt prioriser les cyclistes. Par contre, il est important de garder en tête qu'il

s'agit d'une approche controversée étant donné les restrictions appliquées à la conduite automobile. Malgré tout, si les autorités sont sérieuses dans leurs désirs d'encourager des comportements de mobilité plus durable, la perméabilité filtrée peut être vue comme un bon outil pour différencier les modes de transports à promouvoir et ceux que l'on se doit de restreindre.

4.4 Limites de l'étude et pistes de recherches futures

4.4.1 Limites des données et de la méthode

Les principales limites de l'étude sont relatives à l'utilisation des données d'OSM, au calcul de l'indice, à la sélection des villes et à la construction de l'indice de perméabilité filtrée.

Premièrement, l'utilisation des données d'OSM mène à deux limites. D'une part, comme déjà énoncé, les villes africaines (données OSM incomplètes) et russes (différences dans le calcul des trajets) n'ont pas pu être sélectionnées. Ainsi, il n'a pas été possible de répondre entièrement à la question de recherche, soit d'évaluer et de comparer le niveau de perméabilité filtrée de villes situées dans l'ensemble des grandes régions géographiques du monde. Par contre, nous sommes d'avis que les résultats permettent de dresser un portrait complet dans les deux principales régions géographiques ciblées dans la revue de littérature, soit l'Europe et l'Amérique du Nord. D'autre part, le calcul de trajet avec OSM ne prend pas en compte la signalisation temporelle, par exemple interdisant uniquement aux automobiles un virage à gauche sur l'heure de pointe du matin à partir des artères principales (sur ces tronçons, le virage à gauche est toujours permis). Cette signalisation peut augmenter significativement le niveau de perméabilité filtrée à certains endroits. Par contre, nous sommes d'avis qu'elle influence que très peu le niveau de perméabilité filtrée au sein d'une ville.

Deuxièmement, le calcul de l'indice est relativement long et complexe à effectuer. Le temps nécessaire pour le calculer à partir d'un point est d'environ 80 secondes. L'utilisation d'un ordinateur puissant et permettant du *multiprocessing* est donc essentielle pour une analyse impliquant un grand nombre de villes. De plus, plusieurs manipulations doivent être exécutées avant le calcul de l'indice (extraction des limites administratives et du réseau des villes, préparation des serveurs locaux, préparation du jeu de données Landsat). Ainsi, le calcul de l'indice de perméabilité filtrée nécessite de maîtriser plusieurs outils et types de données. En ce sens, le deuxième critère présenté à la section 2.2 (*Critères à considérer lors de*

l'opérationnalisation d'un concept), soit celui de la facilité de calcul fait défaut. Malgré tout, la démarche a été automatisée le plus possible pour simplifier et accélérer de possibles futures analyses. Un paquet de R pourrait également être développé.

Troisièmement, comme toute sélection de villes, elle est questionnable. Cette sélection aurait pu être basée sur des critères différents et s'appliquer sur un échantillon plus important. De plus, des différences entre les villes sélectionnées en termes de superficie, population, situation géographique, culture et morphologie urbaine, pour ne nommer que ces caractéristiques, rendent plus délicate la comparaison de leurs résultats. Par contre, nous sommes d'avis qu'il est malgré tout approprié et juste de comparer les résultats entre les villes puisque l'indice de perméabilité filtrée est pondéré par la population. En effet, cette pondération permet de comparer les villes sur la même base en caractérisant le niveau de perméabilité filtrée dans lequel leurs populations évoluent. De plus, les villes retenues pour l'analyse ont permis d'illustrer les facteurs contribuant à la variabilité de la perméabilité filtrée à travers le monde.

Quatrièmement, l'indice repose sur trois dimensions (configuration, connectivité et densité), sur lesquelles ils auraient été possibles d'appliquer différentes pondérations. Comme le démontre le tableau 14 de l'annexe 1 qui présente l'indice désagrégé par dimension pour chacune des villes, la dimension de la densité semble avoir une plus grande influence sur les résultats. En effet, on y trouve des valeurs plus élevées et une plus grande variabilité que dans les deux autres dimensions. Par contre, des analyses subséquentes seraient nécessaires pour approfondir la question. Par exemple, des analyses de sensibilité et d'incertitude pourraient être conduites dans des études ultérieures, notamment avec les indices de Sobol (Sobol 1993 ; Homma et Saltelli 1996 ; Saisana, Saltelli et Tarantola 2005), pour mieux comprendre l'influence de chaque dimension sur l'indice de perméabilité filtrée et ainsi le raffiner. Aussi, une limite de l'indice de perméabilité filtrée est qu'il ne prend pas en compte le confort ou « l'agrément » d'un trajet en vélo. Ainsi, qu'il s'agisse d'une artère achalandée ou d'une rue résidentielle calme, le résultat de l'indice sera inchangé si la liberté de mouvement offerte à un.e cycliste est la même en comparaison à celle d'un.e automobiliste. Par contre, les études portant sur la perméabilité d'un réseau n'intègrent habituellement pas cet aspect. De plus, le confort étant subjectif il serait également complexe à modéliser. Malgré tout, tel qu'indiqué au tableau 7, l'ensemble des infrastructures cyclables séparées ont été considérées dans le calcul de la densité du réseau cyclable et non uniquement celle augmentant le niveau de perméabilité filtrée. Ceci permet indirectement de refléter le confort offert par ces voies.

4.4.2 Pistes de recherche futures

Aborder les limites de la recherche a permis d'identifier quelques pistes de recherches futures qui contribueraient à l'avancement des connaissances sur la perméabilité filtrée. Premièrement, l'indice de perméabilité filtrée pourrait être amélioré.

Deuxièmement, dans la lignée des récents travaux sur l'accessibilité aux réseaux cyclables sous l'angle de l'équité environnementale (Houde, Apparicio et Séguin 2018 ; Parker, Hinson et Porter 2021 ; Braun, Rodriguez et Gordon-Larsen 2019), il serait intéressant d'explorer quels sont les groupes de population bénéficiant le plus d'un haut niveau de perméabilité filtrée. Une approche longitudinale permettrait également d'explorer si le développement rapide du réseau cyclable dans plusieurs grandes villes du monde a permis ou non ou non d'augmenter significativement le niveau de perméabilité filtrée. Pour ce faire, l'utilisation des données OSM serait de nouveau très intéressante puisqu'elles sont disponibles pour différentes années.

Troisièmement, il serait approprié d'examiner l'effet de la perméabilité filtrée sur les comportements de mobilité par des études corrélatives. Ce type d'étude viserait à capturer par des modèles de régression l'influence de la perméabilité filtrée sur la pratique du vélo en comparaison à celle d'autres caractéristiques de l'environnement urbain et variables de contrôle. Il s'agirait de la première fois qu'un tel modèle inclurait une variable portant sur la perméabilité filtrée, les études sur le sujet intégrant uniquement des variables sur la perméabilité d'un réseau (Berrigan, Pickle et Dill 2010 ; Ozbil, Peponis et Stone 2011).

Quatrièmement, et dans une logique plus exploratoire, de futures recherches pourraient viser à intégrer davantage l'utilisation du sol dans le concept de perméabilité filtrée pour en arriver à un concept potentiellement encore plus porteur, soit celui de l'« accessibilité filtrée ».

CONCLUSION

Il a été démontré que la mobilité influence grandement la durabilité des villes de par ses multiples impacts négatifs d'ordre environnementaux, sociaux et économiques. Ces impacts étant en grande partie causés par une forte utilisation de l'automobile, plusieurs politiques de transport visent aujourd'hui une réduction de son utilisation au profit du vélo. Par contre, il s'agit d'un objectif particulièrement difficile à atteindre pour les nombreuses villes dont le développement a été centré sur l'automobile. En effet, ces villes ont hérité d'environnements urbains peu compatibles avec cet objectif comme ils avantagent grandement l'automobile, lègue difficile à altérer. Par contre, il a été illustré que la perméabilité filtrée est un principe de planification des transports permettant de favoriser un transfert modal de l'automobile vers le vélo en rééquilibrant l'efficacité de ces modes de transports. Pour ce faire, ce principe énonce qu'il est impératif que la liberté de mouvement permise par le réseau de transport d'une ville soit plus grande si l'on se déplace en vélo comparativement à en automobile. Finalement, il a été souligné que malgré que cette approche puisse certainement contribuer à l'atteinte d'une mobilité urbaine durable, il s'agit d'une approche peu connue et étudiée.

Dans le cadre de ce mémoire, les objectifs étaient d'exposer et d'opérationnaliser pour une première fois le concept de perméabilité filtrée pour ensuite analyser la variabilité de son niveau à travers le monde. Un indice de perméabilité filtrée a été construit de façon à comparer la liberté de mouvement (perméabilité) qu'offre le réseau accessible en vélo et celui en automobile. Il se base sur les trois dimensions caractérisant un réseau, soit la configuration, la densité et la connectivité. L'indice a été calculé à l'aide des données d'*OpenStreetMap* (OSM) dans soixante villes regroupées en cinq régions géographiques, soient l'Amérique du Nord (n=16), l'Amérique centrale et du Sud (n=8), l'Asie (n=10), l'Europe (n=21) et l'Océanie (n=5). Les résultats démontrent que le niveau de perméabilité filtrée est environ trois fois plus élevé en Europe que dans les quatre autres régions géographiques, où les résultats s'avèrent être sensiblement les mêmes en moyenne. Le principal élément d'explication évoqué sont les politiques encadrant la mise en place d'infrastructures cyclables qui favorise indirectement un accroissement du niveau de perméabilité filtrée, et ce, uniquement dans les villes européennes. À l'inverse, le niveau de perméabilité filtrée se trouve à être particulièrement faible dans les villes états-uniennes, et ce, puisque leurs structures spatiales ont été basées en grande partie sur l'automobile. De plus, la mise en place d'infrastructures cyclables n'y a pas été encouragée pendant plusieurs décennies.

Ces constats s'appliquent également aux villes canadiennes et océaniques, mais dans une moindre mesure.

En regard de ce qui a été soulevé dans la recherche, il apparaît tout à fait pertinent d'intégrer davantage la perméabilité filtrée comme approche en planification des transports. Son principal avantage est la multitude de techniques possibles pour l'implanter, ce qui lui permet d'être facilement adaptable aux différents types de morphologie urbaine. De plus, les coûts associés sont habituellement plutôt faibles et son impact sur les comportements de mobilité est connu pour être rapide. Par contre, il a été précisé que son acceptabilité peut être difficile en raison des contraintes imposées à l'automobile. Malgré tout, si les autorités veulent véritablement encourager une mobilité durable, la perméabilité filtrée peut être vue comme un outil efficace pour planifier la mobilité urbaine en favorisant l'utilisation du vélo et non plus celle de l'automobile.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, John. 1999. « The social implications of hypermobility. » *Report for OECD Project on Environmentally Sustainable Transport* : 95-134.
- Ahern, Jack. 2011. « From fail-safe to safe-to-fail: Sustainability and resilience in the new urban world. » *Landscape and urban Planning* 100 (4): 341-343.
- Ahvenniemi, Hannele, Aapo Huovila, Isabel Pinto-Seppä et Miimu Airaksinen. 2017. « What are the differences between sustainable and smart cities? » *Cities* 60: 234-245.
- AIE. 2011. « World energy outlook 2011. » *Int Energy Agency* 666.
- . 2018. *Share of Total Final Consumption (TFC) by Sector—World 2016*. Consulté le 2020-04-02. [https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20\(TPES\)%20by%20source](https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=Total%20primary%20energy%20supply%20(TPES)%20by%20source).
- . 2019. *World energy outlook 2019*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>.
- Akbari, Hashem, Surabi Menon et Arthur Rosenfeld. 2009. « Global cooling: increasing worldwide urban albedos to offset CO 2. » *Climatic change* 94 (3-4): 275-286.
- Alberti, Marina. 1996. « Measuring urban sustainability. » *Environmental impact assessment review* 16 (4): 381-424.
- Aldred, Rachel. 2015. « Adults' attitudes towards child cycling: a study of the impact of infrastructure. » *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 15 (2).
- Aldred, Rachel et Joseph Croft. 2019. « Evaluating active travel and health economic impacts of small streetscape schemes: An exploratory study in London. » *Journal of transport & health* 12: 86-96.
- Aldred, Rachel, Joseph Croft et Anna Goodman. 2019. « Impacts of an active travel intervention with a cycling focus in a suburban context: One-year findings from an evaluation of London's in-progress mini-Hollands programme. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 123: 147-169.
- Andrews, Annabelle. 1990. « Fragmentation of habitat by roads and utility corridors: a review. » *Australian Zoologist* 26 (3-4): 130-141.

- Angel, Shlomo, Jason Parent, Daniel L Civco et Alejandro M Blei. 2011. « Making room for a planet of cities. ».
- Arrington, GB et Robert Cervero. 2008. « TCRP Report 128: Effects of TOD on housing, parking, and travel. » *Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC* 3: 37.
- Arsenio, Elisabete, Karel Martens et Floridea Di Ciommo. 2016. « Sustainable urban mobility plans: Bridging climate change and equity targets? » *Research in Transportation Economics* 55: 30-39.
- ARTM. 2020. *Enquête origine-destination 2018 - Faits saillants de l'état de la mobilité des personnes dans la région métropolitaine de Montréal*. https://www.artm.quebec/wp-content/uploads/2020/01/CA_Faits-saillants_EOD_COMPLET_WEB_14012020_R002.pdf.
- Asaeda, Takashi, Vu Thanh Ca et Akio Wake. 1996. « Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. » *Atmospheric environment* 30 (3): 413-427.
- Assembly, Greater London. 2012. Written Submissions Received for the Transport Committee's Investigation into Cycle Safety in London. https://www.cycling-embassy.org.uk/sites/cycling-embassy.org.uk/files/documents/Cycle_Safety_Evidence_reduced.pdf.
- Azetsop, Jacquineau. 2010. « Social justice approach to road safety in Kenya: addressing the uneven distribution of road traffic injuries and deaths across population groups. » *Public health ethics* 3 (2): 115-127.
- Babalik-Sutcliffe, Ela. 2013. « Urban form and sustainable transport: Lessons from the Ankara case. » *International journal of sustainable transportation* 7 (5): 416-430.
- Babisch, Wolfgang. 2015. « The cardiovascular effects of noise on man. » *The Journal of the Acoustical Society of America* 137 (4): 2278-2278.
- Baldauf, R, N Watkins, D Heist, C Bailey, P Rowley et R Shores. 2009. « Near-road air quality monitoring: factors affecting network design and interpretation of data. » *Air Quality, Atmosphere & Health* 2 (1): 1-9.
- Banister, David. 2005. *Unsustainable transport: city transport in the new century*. : Taylor & Francis.
- . 2008. « The sustainable mobility paradigm. » *Transport policy* 15 (2): 73-80.
- . 2011. « Cities, mobility and climate change. » *Journal of Transport geography* 19 (6): 1538-1546.

- . 2012. « Assessing the reality—Transport and land use planning to achieve sustainability. » *Journal of Transport and Land Use* 5 (3): 1-14.
- Barber, Benjamin R. 2013. *If mayors ruled the world: Dysfunctional nations, rising cities.* : Yale University Press.
- Barrington-Leigh, C. et A. Millard-Ball. 2020. « Global trends toward urban street-network sprawl. » *Proc Natl Acad Sci U S A* 117 (4): 1941-1950. doi: 10.1073/pnas.1905232116.
- Barrington-Leigh, Christopher et Adam Millard-Ball. 2017. « The world's user-generated road map is more than 80% complete. » *PloS one* 12 (8): e0180698.
- Basford, L, S Reid, T Lester, J Thomson et A Tolmie. 2002. « Drivers' perceptions of cyclists. » *Department for Transport* 42.
- Benítez-López, Ana, Rob Alkemade et Pita A Verweij. 2010. « The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis. » *Biological conservation* 143 (6): 1307-1316.
- Berrigan, David, Linda W Pickle et Jennifer Dill. 2010. « Associations between street connectivity and active transportation. » *International journal of health geographics* 9 (1): 20.
- Bertolini, Luca, Frank Le Clercq et Loek Kapoen. 2005. « Sustainable accessibility: a conceptual framework to integrate transport and land use plan-making. Two test-applications in the Netherlands and a reflection on the way forward. » *Transport policy* 12 (3): 207-220.
- Bhat, Chandra, Susan Handy, Kara Kockelman, Hani Mahmassani, Qinglin Chen et Lisa Weston. 2000. *Development of an urban accessibility index: Literature review*: University of Texas at Austin. Center for Transportation Research.
- Black, William R. 2010. *Sustainable transportation: problems and solutions.* : Guilford Press.
- Boarnet, Marlon G et Sharon Sarmiento. 1998. « Can land-use policy really affect travel behaviour? A study of the link between non-work travel and land-use characteristics. » *Urban Studies* 35 (7): 1155-1169.
- Boulanger, Paul-Marie. 2004. « Les indicateurs de développement durable: un défi scientifique, un enjeu démocratique. » *Les séminaires de l'Idri* 12: 24.
- Bratzel, Stefan. 1999. « Conditions of success in sustainable urban transport policyPolicy change in'relatively successful'European cities. » *Transport reviews* 19 (2): 177-190.
- Brauer, Michael, Conor Reynolds et Perry Hystad. 2013. « Traffic-related air pollution and health in Canada. » *CMAJ* 185 (18): 1557-1558.

- Braun, Lindsay M, Daniel A Rodriguez et Penny Gordon-Larsen. 2019. « Social (in) equity in access to cycling infrastructure: Cross-sectional associations between bike lanes and area-level sociodemographic characteristics in 22 large US cities. » *Journal of Transport geography* 80: 102544.
- Broach, Joseph, Jennifer Dill et John Gliebe. 2012. « Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (10): 1730-1740.
- Brovelli, Maria Antonia, Marco Minghini, Monia Molinari et Peter Mooney. 2017. « Towards an automated comparison of OpenStreetMap with authoritative road datasets. » *Transactions in GIS* 21 (2): 191-206.
- Brown, Lester. 2001. « Building an Economy for the Earth. » *Earth Policy Institute*.
- Bryan, ME et W Tempest. 1973. « Are our noise laws adequate? » *Applied Acoustics* 6 (3): 219-232.
- Buehler, Ralph et John Pucher. 2012. « International Overview: Cycling Trends in Western Europe, North America, and Australia. » *City cycling* : 9-29.
- Burton, Elizabeth. 2000. « The compact city: just or just compact? A preliminary analysis. » *Urban Studies* 37 (11): 1969-2006.
- Buyantuyev, Alexander et Jianguo Wu. 2010. « Urban heat islands and landscape heterogeneity: linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. » *Landscape ecology* 25 (1): 17-33.
- Calthorpe, Peter. 1993. *The next American metropolis: Ecology, community, and the American dream*. : Princeton architectural press.
- Canada, Santé. 2017. *Évaluation des risques pour la santé humaine des gaz d'échappement des moteurs à essence*. Consulté le 2020-04-02. http://publications.gc.ca/collections/collection_2017/sc-hc/H144-52-2017-fra.pdf.
- canadienne, La Presse. 2020. « Les émissions de gaz à effet de serre du Canada ont encore grimpé en 2018. » *La Presse*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1694379/emissions-gaz-effet-serre-canada-hausse>.
- Carrier, Mathieu. 2015. « La distribution des polluants atmosphériques et du bruit provenant du transport routier dans les milieux résidentiels de l'île de Montréal: un cas d'équité environnementale. », Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique.

- CE. 1992. « Green Paper on the Impact of Transport on the Environment. » *A Community Strategy for "Sustainable Mobility"*, COM (192) 46.
- Cebr. 2014. *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030*. [https://www.ibtta.org/sites/default/files/documents/MAF/Costs-of-Congestion-INRIX-Cebr-Report \(3\).pdf](https://www.ibtta.org/sites/default/files/documents/MAF/Costs-of-Congestion-INRIX-Cebr-Report%20(3).pdf).
- Cervero, Robert et Michael Duncan. 2003. « Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the San Francisco Bay Area. » *American journal of public health* 93 (9): 1478-1483.
- Cervero, Robert et Kara Kockelman. 1997. « Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. » *Transportation research Part D, Transport and environment* 2 (3): 199-219.
- Cervero, Robert et Carolyn Radisch. 1995. « Travel choices in pedestrian versus automobile oriented neighborhoods. ».
- Chin, Gary KW, Kimberly P Van Niel, Billie Giles-Corti et Mathew Knuiman. 2008. « Accessibility and connectivity in physical activity studies: The impact of missing pedestrian data. » *Preventive medicine* 46 (1): 41-45.
- CHIPS. 2016. *Filtered permeability*. Consulté le 2020-07-05. <https://cyclehighways.eu/design-and-build/infrastructure/filtered-permeability.html>.
- Cities, C40. 2017. *C40 Annual report 2017*. https://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other/uploads/images/2056_C40_ANNUAL_REPORT_2017_original.pdf?1544802871.
- Clark, Charlotte et Stephen A Stansfeld. 2007. « The effect of transportation noise on health and cognitive development: A review of recent evidence. » *International Journal of Comparative Psychology* 20 (2).
- Clifton, Kelly J et Jennifer Dill. 2005. Women's travel behavior and land use: Will new styles of neighborhoods lead to more women walking? In *Transportation research board conference proceedings*.
- CMM. 2017. *Plan directeur du Réseau vélo métropolitain - Grand Montréal* https://cmm.qc.ca/wp-content/uploads/2019/08/20171117_ReseauVelo_planMetropolitain.pdf.
- Copenhagenize Design Company. 2019. *The 2019 index*. Consulté le 2020-12-05. <https://copenhagenizeindex.eu/the-index>.
- Council, Design. 2014. *Active by design*. [https://www.designcouncil.org.uk/sites/default/files/asset/document/Active By Design Brochure web LATEST.pdf](https://www.designcouncil.org.uk/sites/default/files/asset/document/Active_By_Design_Brochure_web_LATEST.pdf).

- Cremtl. 2006. *Répertoire des mesures d'apaisement de la circulation dans sept arrondissements de Montréal*.
<https://cremtl.org/sites/default/files/upload/documents/publications/repertoire.pdf>.
- Crozet, Yves et Iragaël Joly. 2004. « Budgets temps de transport: les sociétés tertiaires confrontées à la gestion paradoxale du " bien le plus rare". » *Les Cahiers scientifiques du transport* (45): pp. 27-48.
- CTD. 2005. *Defining sustainable transportation*. Winnipeg, Canada.
- Damant-Sirois, Gabriel et Ahmed M El-Generdy. 2015. « Who cycles more? Determining cycling frequency through a segmentation approach in Montreal, Canada. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77: 113-125.
- Davis, Adrian et Linda J Jones. 1996. « Children in the urban environment: an issue for the new public health agenda. » *Health & place* 2 (2): 107-113.
- Davis, Adrian, Carolina Valsecchi et Malcolm Fergusson. 2007. « Unfit for purpose: how car use fuels climate change and obesity. ».
- De Bourdeaudhuij, Ilse, Pedro J Teixeira, Greet Cardon et Benedicte Deforche. 2005. « Environmental and psychosocial correlates of physical activity in Portuguese and Belgian adults. » *Public health nutrition* 8 (7): 886-895.
- De Ceuster, G, M Martens et Jens Borken. 2005. « ASSESS-Assessment of the contribution of the TEN and other transport policy measures to the mid-term implementation of the White Paper on the European Transport Policy for 2010'. Inception Report. ».
- de Freitas Miranda, Hellem et Antônio Néelson Rodrigues da Silva. 2012. « Benchmarking sustainable urban mobility: The case of Curitiba, Brazil. » *Transport policy* 21: 141-151.
- De Marco, Ario. 2019. « Reshaping metropolitan transportation cultures. A comparative study of bicycle friendly cities in Europe and the case of the Metropolitan City of Milano. », Univerza v Novi Gorici.
- DeCicco, John, Freda Fung et Feng An. 2006. *Global warming on the road: the climate impact of America's automobiles*. : Environmental Defense.
- Di Gregorio, Graziano et Simona Palmieri. 2016. « Cycling in a megacity: the case of London. . ». https://www.researchgate.net/profile/Simona_Palmieri/publication/308419064_CYCLING_IN_A_MEGACITY_THE_CASE_OF_LONDON/links/57e40ac808aee9b409fbfaa6/CYCLING-IN-A-MEGACITY-THE-CASE-OF-LONDON.pdf.
- Dill, Jennifer. 2004. Measuring network connectivity for bicycling and walking. In *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*.

- . 2009. « Bicycling for transportation and health: the role of infrastructure. » *Journal of public health policy* 30 (1): S95-S110.
- Dill, Jennifer, Christopher M Monsere et Nathan McNeil. 2012. « Evaluation of bike boxes at signalized intersections. » *Accident Analysis & Prevention* 44 (1): 126-134.
- Division, Helsinki's Urban Environment. 2019. *Bicycle Account 2019*. <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/esitteet/esite-01-19-en.pdf>.
- Domarchi, Cristian, Alejandro Tudela et Angélica González. 2008. « Effect of attitudes, habit and affective appraisal on mode choice: an application to university workers. » *Transportation* 35 (5): 585-599.
- Dupuy, Gabriel. 1999. « From the “magic circle” to “automobile dependence”: measurements and political implications. » *Transport policy* 6 (1): 1-17.
- ECMT. 2000. *Sustainable Transport Policies*. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264187696-en>.
- Edenhofer, Ottmar. 2015. *Climate change 2014: mitigation of climate change*. : Cambridge University Press.
- Edwards, Ryan D. 2008. « Public transit, obesity, and medical costs: assessing the magnitudes. » *Preventive medicine* 46 (1): 14-21.
- Ellis, Geraint, Ruth Hunter, Mark A Tully, Michael Donnelly, Luke Kelleher et Frank Kee. 2016. « Connectivity and physical activity: using footpath networks to measure the walkability of built environments. » *Environment and Planning B: Planning and Design* 43 (1): 130-151. doi: 10.1068/b140039p.
- Erickson, Peter et Kevin Tempest. 2015. « Keeping cities green: Avoiding carbon lock-in due to urban development. » *Seattle, WA: Stockholm Environmental Institute*.
- Europe, ITDP. 2015. *Case study : Houten, Utrecht, the netherlands*. <https://itdpdotorg.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/07/22.-092211-ITDP-NED-Desktop-Houten.pdf>.
- Evans, Robert, Simon Guy et Simon Marvin. 2001. « Views of the city: multiple pathways to sustainable transport futures. » *Local Environment* 6 (2): 121-133.
- Ewing, Reid. 1997. « Is Los Angeles-style sprawl desirable? » *Journal of the American planning association* 63 (1): 107-126.

- . 2019. *Best development practices: doing the right thing and making money at the same time*. : Routledge.
- Ewing, Reid et Robert Cervero. 2001. « Travel and the built environment: a synthesis. » *Transportation Research Record* 1780 (1): 87-114.
- Ferster, Colin, Jaimy Fischer, Kevin Manaugh, Trisalyn Nelson et Meghan Winters. 2020. « Using OpenStreetMap to inventory bicycle infrastructure: A comparison with open data from cities. » *International journal of sustainable transportation* 14 (1): 64-73.
- Finco, Adele et Peter Nijkamp. 2001. « Pathways to urban sustainability. » *Journal of Environmental Policy & Planning* 3 (4): 289-302.
- Fishman, Elliot. 2016. *Cycling as transport*. : Taylor & Francis.
- Fléchais, Sylvain. 2011. « Modélisation des effets de la végétalisation en milieu urbain sur les eaux de ruissellement dirigées à l'égout. », École de technologie supérieure.
- Foletta, Nicole. 2011. « Houten. Utrecht, the Netherlands. Case study. » *Institute for Transportation and Development Policy*.
- Forester, John. 1993. *Effective cycling*. : MIT Press.
- Fradkin, Philip L. 2005. *The great earthquake and firestorms of 1906: how San Francisco nearly destroyed itself*. : Univ of California Press.
- Frank, Lawrence D, Martin A Andresen et Thomas L Schmid. 2004. « Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars. » *American journal of preventive medicine* 27 (2): 87-96.
- Frank, Lawrence D, Brian Stone Jr et William Bachman. 2000. « Linking land use with household vehicle emissions in the central Puget Sound: methodological framework and findings. » *Transportation research part D: transport and environment* 5 (3): 173-196.
- Frank, LD et D Hawkins. 2008. « Giving Pedestrians an Edge—Using Street Layout to Influence Transportation Choice. » *Ottawa: Canada Mortgage and Housing Corporation*.
- Fraser, Simon DS et Karen Lock. 2011. « Cycling for transport and public health: a systematic review of the effect of the environment on cycling. » *European journal of public health* 21 (6): 738-743.
- Furth, Peter G. 2012. « Bicycling infrastructure for mass cycling: a trans-Atlantic comparison. » *City cycling* : 105-140.

- Gallopín, Gilberto C. 2006. « Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. » *Global environmental change* 16 (3): 293-303.
- Geurs, Karst T et Bert Van Wee. 2004. « Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. » *Journal of Transport geography* 12 (2): 127-140.
- Giguère, Méliissa. 2009. « Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. » *Revue de littérature, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique, Gouvernement du Québec.*
- Gilbert, Richard et Anthony Perl. 2010. *Transport revolutions: moving people and freight without oil.* : New Society Publishers.
- Gilbert, Richard, Anthony Perl et David Banister. 2007. « Transport revolutions: moving people and freight without oil. Earthscan. ».
- Giles-Corti, Billie, Gina Wood, Terri Pikora, Vincent Learnihan, Max Bulsara, Kimberly Van Niel, Anna Timperio, Gavin McCormack et Karen Villanueva. 2011. « School site and the potential to walk to school: The impact of street connectivity and traffic exposure in school neighborhoods. » *Health & place* 17 (2): 545-550.
- Gillis, Dominique, Ivana Semanjski et Dirk Lauwers. 2016. « How to monitor sustainable mobility in cities? Literature review in the frame of creating a set of sustainable mobility indicators. » *Sustainability* 8 (1): 29.
- Giraud, Timothée, R Cura et M Viry. 2017. *osrm: Interface Between R and the OpenStreetMap-Based Routing Service OSRM.*
- Golinska, Paulina et Marcin Hajdul. 2012. *Sustainable transport: new trends and business practices.* : Springer Science & Business Media.
- Gössling, Stefan. 2016. « Urban transport justice. » *Journal of Transport geography* 54: 1-9.
- Gössling, Stefan et Andy S Choi. 2015. « Transport transitions in Copenhagen: Comparing the cost of cars and bicycles. » *Ecological economics* 113: 106-113.
- Graw, Matthias et Hans Günter König. 2002. « Fatal pedestrian–bicycle collisions. » *Forensic Science International* 126 (3): 241-247.
- Grimm, Nancy B, Stanley H Faeth, Nancy E Golubiewski, Charles L Redman, Jianguo Wu, Xuemei Bai et John M Briggs. 2008. « Global change and the ecology of cities. » *science* 319 (5864): 756-760.

- Gröchenig, Simon, Richard Brunauer et Karl Rehl. 2014. « Digging into the history of VGI datasets: results from a worldwide study on OpenStreetMap mapping activity. » *Journal of Location Based Services* 8 (3): 198-210.
- Grübler, Arnulf. 2004. « Transitions in energy use. » *Encyclopedia of energy* 6: 163-177.
- Gudmundsson, Henrik. 2001. « Indicators and performance measures for transportation, environment and sustainability in north America: Report from a German Marshall Fund Fellowship 2000 individual study tour October 2000. » *Research Notes from Neri*.
- Gudmundsson, Henrik et Mattias Höjer. 1996. « Sustainable development principles and their implications for transport. » *Ecological economics* 19 (3): 269-282.
- Gwilliam, Ken. 2003. « Urban transport in developing countries. » *Transport reviews* 23 (2): 197-216.
- Habitat, UN. 2013a. *Planning and design for sustainable urban mobility: Global report on human settlements 2013*. New York: United Nations.
- . 2013b. *State of the world's cities 2012/2013: Prosperity of cities*. : Routledge.
- Haklay, Mordechai. 2010. « How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. » *Environment and Planning B: Planning and Design* 37 (4): 682-703.
- Handy, Susan. 1993. « Regional versus local accessibility: Implications for nonwork travel. ».
- . 2005. « Critical assessment of the literature on the relationships among transportation, land use, and physical activity. » *Transportation Research Board and the Institute of Medicine Committee on Physical Activity, Health, Transportation, and Land Use Resource paper for TRB Special Report 282* (1): 1-81.
- Handy, Susan, Xinyu Cao et Patricia Mokhtarian. 2005. « Correlation or causality between the built environment and travel behavior? Evidence from Northern California. » *Transportation research part D: transport and environment* 10 (6): 427-444.
- Handy, Susan L. 2002. « Accessibility-vs. mobility-enhancing strategies for addressing automobile dependence in the US. ».
- Handy, Susan, Robert G Paterson et Kent S Butler. 2003. « Planning for street connectivity: getting from here to there. » *Apa Planning Advisory Service Reports* (515): 1-75.
- Hansen, Walter G. 1959. « How accessibility shapes land use. » *Journal of the American Institute of planners* 25 (2): 73-76.

- Hart, Joshua et Graham Parkhurst. 2011. « Driven to excess: Impacts of motor vehicles on the quality of life of residents of three streets in Bristol UK. » *World Transport Policy & Practice* 17 (2).
- Heesch, Kristiann C, Shannon Sahlqvist et Jan Garrard. 2011. « Cyclists' experiences of harassment from motorists: Findings from a survey of cyclists in Queensland, Australia. » *Preventive medicine* 53 (6): 417-420.
- Hensher, David A et April J Reyes. 2000. « Trip chaining as a barrier to the propensity to use public transport. » *Transportation* 27 (4): 341-361.
- Hess, Paul M. 1997. « Measures of connectivity [Streets: Old paradigm, new investment]. » *Places* 11 (2).
- Hickman, Robin, Peter Hall et David Banister. 2013. « Planning more for sustainable mobility. » *Journal of Transport geography* 33: 210-219.
- Hilbers, Brechtje. 2008. « The influence of the spatial planning on bicycle use and health. » *Comparison between Houten and Leidsche Rijn Bilthoven, Nederland: Planbureau voor de Leefomgeving (Ruimte, Infrastructuur en Mobiliteit)*.
- Hochmair, Hartwig H, Dennis Zielstra et Pascal Neis. 2015. « Assessing the Completeness of Bicycle Trail and Lane Features in Open Street Map for the United States. » *Transactions in GIS* 19 (1): 63-81.
- Hoehner, Christine M, Laura K Brennan Ramirez, Michael B Elliott, Susan L Handy et Ross C Brownson. 2005. « Perceived and objective environmental measures and physical activity among urban adults. » *American journal of preventive medicine* 28 (2): 105-116.
- Hoek, Gerard, Bert Brunekreef, Sandra Goldbohm, Paul Fischer et Piet A van den Brandt. 2002. « Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. » *The lancet* 360 (9341): 1203-1209.
- Holden, Erling, Geoffrey Gilpin et David Banister. 2019. « Sustainable mobility at thirty. » *Sustainability* 11 (7): 1965.
- Holtzclaw, John. 1994. *Using residential patterns and transit to decrease auto dependence and costs.* : Natural Resources Defense Council San Francisco, CA.
- Homma, Toshimitsu et Andrea Saltelli. 1996. « Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. » *Reliability Engineering & System Safety* 52 (1): 1-17.

- Houde, Maxime, Philippe Apparicio et Anne-Marie Séguin. 2018. « A ride for whom: Has cycling network expansion reduced inequities in accessibility in Montreal, Canada? » *Journal of Transport geography* 68: 9-21.
- Hull, Angela. 2008. « Policy integration: what will it take to achieve more sustainable transport solutions in cities? » *Transport policy* 15 (2): 94-103.
- Hymel, Kent M, Kenneth A Small et Kurt Van Dender. 2010. « Induced demand and rebound effects in road transport. » *Transportation Research Part B: Methodological* 44 (10): 1220-1241.
- III, Habitat. 2016. « New Urban Agenda. ». <https://habitat3.org/the-new-urban-agenda/>.
- Imran, Muhammad et Jane Pearce. 2015. « Discursive barriers to sustainable transport in New Zealand cities. » *Urban Policy and Research* 33 (4): 392-415.
- Infinity, City. 2018. « Making Streets Better: A Guide To Filtered Permeability. ». <https://cityinfinity.files.wordpress.com/2018/04/filtered-permeability-guidance-v2.pdf>.
- Jabareen, Yosef Rafeq. 2006. « Sustainable urban forms: Their typologies, models, and concepts. » *Journal of Planning Education and Research* 26 (1): 38-52.
- Jacobs, Jane. 1961. *The death and life of great American cities*. : Vintage.
- Jakovljevic, Branko, Katarina Paunovic et Goran Belojevic. 2009. « Road-traffic noise and factors influencing noise annoyance in an urban population. » *Environment international* 35 (3): 552-556.
- James, Paul. 2014. *Urban sustainability in theory and practice: circles of sustainability*. : Routledge.
- Kahn Ribeiro, Suzana, Shigeki Kobayashi, Michel Beuthe, Jorge Gasca, David Greene, David S Lee, Yasunori Muromachi, Peter J Newton, Steven Plotkin et Daniel Sperling. 2007. « Transport and its infrastructure. » *Climate change* 2007.
- Karagulian, Federico, Claudio A Belis, Carlos Francisco C Dora, Annette M Prüss-Ustün, Sophie Bonjour, Heather Adair-Rohani et Markus Amann. 2015. « Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. » *Atmospheric environment* 120: 475-483.
- Klopp, Jacqueline M et Danielle L Petretta. 2017. « The urban sustainable development goal: Indicators, complexity and the politics of measuring cities. » *Cities* 63: 92-97.
- Knoflacher, Hermann, Philipp Rode et Geetam Tiwari. 2008. « How roads kill cities. ».

- Koorey, Glen. 2012. « Neighbourhood greenways: Invisible infrastructure for walking and cycling. ».
- Künzli, Nino, Reinhard Kaiser, Sylvia Medina, Michael Studnicka, Olivier Chanel, Paul Filliger, Max Herry, F Horak Jr, Valérie Puybonnieux-Textier et Philippe Quénel. 2000. « Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. » *The lancet* 356 (9232): 795-801.
- Kwok, Rebecca CW et Anthony GO Yeh. 2004. « The use of modal accessibility gap as an indicator for sustainable transport development. » *Environment and Planning A* 36 (5): 921-936.
- Laboratory, Oak Ridge National. 2019. Landscan. <https://landscan.ornl.gov/>.
- Lam, Tiffany F. 2018. « Hackney: a cycling borough for whom? » *Applied Mobilities* 3 (2): 115-132.
- Lawson, Anneka R, Vikram Pakrashi, Bidisha Ghosh et WY Szeto. 2013. « Perception of safety of cyclists in Dublin City. » *Accident Analysis & Prevention* 50: 499-511.
- Lebel, Germain, Daniel Busque, M Therrien, P Walsh, J Paradis, MP Brault et M Canuel. 2012. « Bilan de la qualité de l'air au Québec en lien avec la santé, 1975–2009. » *I ndlspd Québec* 59.
- Lee, Chanam et Anne Vernez Moudon. 2006. « Correlates of walking for transportation or recreation purposes. » *Journal of Physical Activity and health* 3 (s1): S77-S98.
- Lee, Sungwon et Bumsoo Lee. 2014. « The influence of urban form on GHG emissions in the US household sector. » *Energy Policy* 68: 534-549.
- Lévesque, Kathleen. 2018. « Les coûts de la congestion évalués à 4,2 milliards pour 2018. » *La Presse*. <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201809/13/01-5196357-les-couts-de-la-congestion-evalues-a-42-milliards-pour-2018.php>.
- Litman, Todd. 2013. « The new transportation planning paradigm. » *Institute of Transportation Engineers ITE Journal* 83 (6): 20.
- . 2017. *Evaluating accessibility for transport planning*. : Victoria Transport Policy Institute.
- Lobstein, Tim. 2004. *Obesity in Children and Young People: A Crisis in Public Health; Report to the World Health Organization*. : Blackwell.
- Lomax, Timothy J. 1997. *Quantifying congestion*. : Transportation Research Board.

- Lucas, Karen. 2012. « Transport and social exclusion: Where are we now? » *Transport policy* 20: 105-113.
- Luck, Matthew A, G Darrel Jenerette, Jianguo Wu et Nancy B Grimm. 2001. « The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint. » *Ecosystems* 4 (8): 782-796.
- Lydall, Ross. 2016. « 'Mini Holland' scheme in Walthamstow hailed as major success as traffic falls by half. » *Evening Standard*. <https://www.standard.co.uk/news/london/mini-holland-scheme-in-walthamstow-hailed-as-major-success-as-traffic-falls-by-half-a3389936.html>.
- Lyons, Glenn. 2018. « Getting smart about urban mobility—aligning the paradigms of smart and sustainable. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 115: 4-14.
- Ma, Liang et Jennifer Dill. 2015. « A37 Does The Installation of Bicycle Boulevards Improve Residents' Perceptions of The Bicycling and Walking Environment? A Panel Study. » *Journal of transport & health* 2 (2): S24.
- Marshall, Stephen. 2005. *Streets and patterns*. : New York: Spon Press.
- Marshall, Wesley E et Norman W Garrick. 2010. « Effect of street network design on walking and biking. » *Transportation Research Record* 2198 (1): 103-115.
- . 2012. « Community design and how much we drive. » *Journal of Transport and Land Use* 5 (2): 5-20.
- Marshall, Wesley E, Daniel P Piatkowski et Norman W Garrick. 2014. « Community design, street networks, and public health. » *Journal of transport & health* 1 (4): 326-340.
- Martens, Karel. 2012. « Justice in transport as justice in accessibility: applying Walzer's 'Spheres of Justice' to the transport sector. » *Transportation* 39 (6): 1035-1053.
- Melia, Steve. 2008. « Neighbourhoods should be made permeable for walking and cycling-but not for cars. » *Local Transport Today* (486).
- . 2012. « Filtered and unfiltered permeability: The European and Anglo-Saxon approaches. » *Project 4*.
- . 2015. *Urban Transport Without the Hot Air, Volume 1: Sustainable Solutions for UK cities*. : Uit Cambridge.
- Meunier, Corinne et Thomas Zéroual. 2006. « Transport durable et développement économique. » *Développement durable et territoires   conomie, g  ographie, politique, droit, sociologie* (Dossier 8).

- Mokhtarian, Patricia L, Ilan Salomon et Susan L Handy. 2006. « The impacts of ICT on leisure activities and travel: a conceptual exploration. » *Transportation* 33 (3): 263-289.
- Mondiale, Banque. 2014. *Urban China: Toward Efficient, Inclusive, and Sustainable Urbanization*. : World Bank Publications.
- Moons, Philip, Werner Budts et Sabina De Geest. 2006. « Critique on the conceptualisation of quality of life: a review and evaluation of different conceptual approaches. » *International journal of nursing studies* 43 (7): 891-901.
- Morris, Jennifer M, PL Dumble et M Ramsay Wigan. 1979. « Accessibility indicators for transport planning. » *Transportation Research Part A: General* 13 (2): 91-109.
- Moudon, Anne Vernez, Paul M Hess, Mary Catherine Snyder et Kiril Stanilov. 1997. « Effects of site design on pedestrian travel in mixed-use, medium-density environments. » *Transportation Research Record* 1578 (1): 48-55.
- Mozos-Blanco, Miguel Ángel, Elisa Pozo-Menéndez, Rosa Arce-Ruiz et Neus Baucells-Aletà. 2018. « The way to sustainable mobility. A comparative analysis of sustainable mobility plans in Spain. » *Transport policy* 72: 45-54.
- Mullen, Caroline, Miles Tight, Anthony Whiteing et Ann Jopson. 2014. « Knowing their place on the roads: What would equality mean for walking and cycling? » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 61: 238-248.
- Neis, Pascal, Dennis Zielstra et Alexander Zipf. 2012. « The street network evolution of crowdsourced maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011. » *Future Internet* 4 (1): 1-21.
- Nesbit, Sundé M, Judith C Conger et Anthony J Conger. 2007. « A quantitative review of the relationship between anger and aggressive driving. » *Aggression and Violent Behavior* 12 (2): 156-176.
- Newman, Peter G et Jeffrey R Kenworthy. 1989. *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*.
- Newman, Peter et Jeffrey Kenworthy. 2006. « Urban design to reduce automobile dependence. » *Opolis* 2 (1).
- Newman, Peter WG et Jeffrey R Kenworthy. 1996. « The land use—transport connection: An overview. » *Land use policy* 13 (1): 1-22.
- Nobis, Claudia. 2003. « The impact of car-free housing districts on mobility behaviour-case study. » *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 67.

- Noland, Robert B et John W Polak. 2002. « Travel time variability: a review of theoretical and empirical issues. » *Transport reviews* 22 (1): 39-54.
- OCDE. 2007. *MANAGING URBAN TRAFFIC CONGESTION*. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/07congestion.pdf>.
- Öhrström, Evy. 1995. « Effects of low levels of road traffic noise during the night: a laboratory study on number of events, maximum noise levels and noise sensitivity. » *Journal of sound and vibration* 179 (4): 603-615.
- OMS. 2011a. « Burden of disease from environmental noise. ». http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf.
- . 2011b. *Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe*. : World Health Organization. Regional Office for Europe.
- . 2013. *Global status report on road safety 2013: supporting a decade of action: summary*: World Health Organization.
- . 2018. *Road Traffic Injuries*. Consulté le 2020-04-03. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>.
- ONU. 2015. « 2014 revisions of the World Urbanization Prospects. » *United Nations Department of Economics and Social Affairs, Population Division: New York, NY, USA* 41. <https://www.un.org/en/development/desa/publications/2014-revision-world-urbanization-prospects.html>.
- OSM. 2019. *Map Features*. https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features_-_Addresses.
- Owens, Susan. 1995. « From 'predict and provide' to 'predict and prevent'? : Pricing and planning in transport policy. » *Transport policy* 2 (1): 43-49.
- Ozbil, Ayse, John Peponis et Brian Stone. 2011. « Understanding the link between street connectivity, land use and pedestrian flows. » *Urban Design International* 16 (2): 125-141. doi: 10.1057/udi.2011.2.
- Pafka, Elek et Kim Dovey. 2017. « Permeability and interface catchment: measuring and mapping walkable access. » *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability* 10 (2): 150-162. doi: 10.1080/17549175.2016.1220413.
- Parker, Sadie K, Haily M Hinson et Rob Porter. 2021. « Spatial accessibility of bicycle routes in the Quad Cities: impacts for environmental justice. » *Leisure/Loisir* : 1-26.

- Parkin, John, Mark Wardman et Matthew Page. 2007. « Models of perceived cycling risk and route acceptability. » *Accident Analysis & Prevention* 39 (2): 364-371.
- Parnell, Susan. 2016. « Defining a global urban development agenda. » *World Development* 78: 529-540.
- Parthasarathi, Pavithra, Hartwig Hochmair et David Levinson. 2015. « Street network structure and household activity spaces. » *Urban Studies* 52 (6): 1090-1112.
- Pelletier-Grenier, Patrice. 2018. « Modélisation de l'impact de la performance des modes actifs et collectifs sur le choix modal. », École Polytechnique de Montréal.
- Pendall, Rolf, Jonathan Martin et William B Fulton. 2002. *Holding the line: Urban containment in the United States*. : Center on Urban and Metropolitan Policy, the Brookings Institution.
- Peponis, John, Sonit Bafna et Zongyu Zhang. 2008. « The connectivity of streets: reach and directional distance. » *Environment and Planning B: Planning and Design* 35 (5): 881-901.
- Poenaru, S, S Rouhani, D Poggi, A Moch et C Colas. 1987. « Study of the pathophysiological effects on chronic exposure to environmental noise in man. » *Acoustics letters* 11 (5): 80-87.
- Pope Iii, C Arden, Richard T Burnett, Michael J Thun, Eugenia E Calle, Daniel Krewski, Kazuhiko Ito et George D Thurston. 2002. « Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. » *Jama* 287 (9): 1132-1141.
- Pouyanne, Guillaume. 2004. « Des avantages comparatifs de la ville compacte à l'interaction mobilité-forme urbaine. Méthodologie et premiers résultats. » *Cahiers scientifiques du transport* 45 (1): 49-82.
- Programme, United Nations Human Settlements. 2010. *State of the world's cities 2010/2011: Bridging the urban divide*. : Earthscan.
- Pucher, John et Ralph Buehler. 2008. « Making cycling irresistible: lessons from the Netherlands, Denmark and Germany. » *Transport reviews* 28 (4): 495-528.
- Pucher, John et Lewis Dijkstra. 2003. « Promoting safe walking and cycling to improve public health: lessons from the Netherlands and Germany. » *American journal of public health* 93 (9): 1509-1516.
- Pucher, John R et Ralph Buehler. 2012. *City cycling*. : MIT press Cambridge, MA.
- Québec, Gouvernement. 2019. Émissions annuelles de gaz à effet de serre au Québec de 1990 à 2017. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2017/tableaux-emissions-annuelles-GES-1990-2017.pdf>.

Québec, Trajectoire et Fondation David Suzuki. 2017. *Évolution des coûts du système de transport par automobile au Québec*. Montréal, Canada. https://fr.dauidsuzuki.org/wp-content/uploads/sites/3/2018/01/Étude_ÉvolutionCoûtsSystèmeTransportQC_FINAL.pdf.

R Core Team. 2020. « R: A language and environment for statistical computing. ».

Randall, Todd A et Brian W Baetz. 2001. « Evaluating pedestrian connectivity for suburban sustainability. » *Journal of Urban Planning and Development* 127 (1): 1-15.

Rees, William et Mathis Wackernagel. 2008. « Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. » In *Urban Ecology*, 537-555. : Springer.

Reitzes, Donald C, Elizabeth J Mutran et Linda A Verrill. 1995. « Activities and self-esteem: Continuing the development of activity theory. » *Research on aging* 17 (3): 260-277.

Rietveld, Piet et Vanessa Daniel. 2004. « Determinants of bicycle use: do municipal policies matter? » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 38 (7): 531-550.

Rode, Philipp, Graham Floater, Nikolas Thomopoulos, James Docherty, Peter Schwinger, Anjali Mahendra et Wanli Fang. 2017. « Accessibility in cities: transport and urban form. » In *Disrupting mobility*, 239-273. : Springer.

Rodrigue, Jean-Paul. 2016. *The geography of transport systems*. : Taylor & Francis.

Rodriguez-Valencia, Alvaro, Daniel Rosas-Satizábal, Daniel Gordo et Andrés Ochoa. 2019. « Impact of household proximity to the cycling network on bicycle ridership: The case of Bogotá. » *Journal of Transport geography* 79: 102480.

Rosas-Satizábal, Daniel et Alvaro Rodriguez-Valencia. 2019. « Factors and policies explaining the emergence of the bicycle commuter in Bogotá. » *Case studies on transport policy* 7 (1): 138-149.

Rutt, Candace D et Karen J Coleman. 2005. « The impact of the built environment on walking as a leisure-time activity along the US/Mexico border. » *Journal of Physical Activity and health* 2 (3): 257-271.

SAAQ. 2017. *Données et statistiques 2017*. <https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/donnees-statistiques-2017.pdf>.

———. 2018. *Bilan routier 2018*. Consulté le 2020-04-03. <https://saaq.gouv.qc.ca/fileadmin/documents/publications/bilan-routier-2018.pdf>.

- Saelens, Brian E et Susan L Handy. 2008. « Built environment correlates of walking: a review. » *Medicine and science in sports and exercise* 40 (7 Suppl): S550.
- Saelens, Brian E, James F Sallis et Lawrence D Frank. 2003. « Environmental correlates of walking and cycling: findings from the transportation, urban design, and planning literatures. » *Annals of behavioral medicine* 25 (2): 80-91.
- Saisana, Michaela, Andrea Saltelli et Stefano Tarantola. 2005. « Uncertainty and sensitivity analysis techniques as tools for the quality assessment of composite indicators. » *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)* 168 (2): 307-323.
- Sanders, Rebecca L. 2015. « Perceived traffic risk for cyclists: The impact of near miss and collision experiences. » *Accident Analysis & Prevention* 75: 26-34.
- Savard, Jean-Pierre L, Philippe Clergeau et Gwenaëlle Mennechez. 2000. « Biodiversity concepts and urban ecosystems. » *Landscape and urban Planning* 48 (3-4): 131-142.
- Schäfer, Andreas, John B Heywood, Henry D Jacoby et Ian A Waitz. 2009. *Transportation in a climate-constrained world*. : MIT press.
- Schär, Christoph et Gerd Jendritzky. 2004. « Hot news from summer 2003. » *Nature* 432 (7017): 559-560.
- Schepers, JP, PA Kroeze, W Sweers et JC Wüst. 2011. « Road factors and bicycle–motor vehicle crashes at unsignalized priority intersections. » *Accident Analysis & Prevention* 43 (3): 853-861.
- Schepers, Paul, Eva Heinen, Rob Methorst et Fred Wegman. 2013. « Road safety and bicycle usage impacts of unbundling vehicular and cycle traffic in Dutch urban networks. » *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 13 (3).
- Schepers, Paul, Divera Twisk, Elliot Fishman, Aslak Fyhri et Anne Jensen. 2017. « The Dutch road to a high level of cycling safety. » *Safety science* 92: 264-273.
- Schlich, Robert, Stefan Schönfelder, Susan Hanson et Kay W Axhausen. 2004. « Structures of leisure travel: temporal and spatial variability. » *Transport reviews* 24 (2): 219-237.
- Schwanen, Tim, David Banister et Jillian Anable. 2011. « Scientific research about climate change mitigation in transport: A critical review. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (10): 993-1006.
- Seto, Karen C, Burak Güneralp et Lucy R Hutya. 2012. « Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. » *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (40): 16083-16088.

- Shearmur, Richard. 2012. « Are cities the font of innovation? A critical review of the literature on cities and innovation. » *Cities* 29: S9-S18.
- Shen, Li-Yin, J Jorge Ochoa, Mona N Shah et Xiaoling Zhang. 2011. « The application of urban sustainability indicators—A comparison between various practices. » *Habitat International* 35 (1): 17-29.
- simplemaps. 2020. World Cities Database [Basic]. Consulté le 2021-02-19. <https://simplemaps.com/data/world-cities>.
- Sioui, Louiselle. 2014. « Pour une approche pragmatique et opérationnelle de la mobilité durable: Concept, méthodes et outils. », École Polytechnique de Montréal.
- Sobol, LM. 1993. « Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. » *Math Model Comput Exp* 1 (4): 407-414.
- Song, Yan. 2005. « Smart Growth and Urban Development Pattern: A Comparative Study. » *International Regional Science Review* 28 (2): 239-265. doi: 10.1177/0160017604273854.
- Sonnentag, Sabine. 2001. « Work, recovery activities, and individual well-being: a diary study. » *Journal of occupational health psychology* 6 (3): 196.
- Spellerberg, IAN. 1998. « Ecological effects of roads and traffic: a literature review. » *Global Ecology & Biogeography Letters* 7 (5): 317-333.
- Staley, Sam, Jefferson G Edgens et Gerard CS Mildner. 1999. *A line in the land: Urban-growth boundaries, smart growth, and housing affordability*. : Reason Public Policy Institute.
- Stangl, Paul. 2011. « The US Pedestrian Plan: Linking Practice and Research. » *Planning Practice & Research* 26 (3): 289-305. doi: 10.1080/02697459.2011.580112.
- . 2019. « Overcoming flaws in permeability measures: modified route directness. » *Journal of Urbanism: International Research on Placemaking and Urban Sustainability* 12 (1): 1-14. doi: 10.1080/17549175.2017.1381143.
- Stangl, Paul et Jeffery M Guinn. 2011. « Neighborhood design, connectivity assessment and obstruction. » *Urban Design International* 16 (4): 285-296.
- Stanley, John K, David A Hensher et Chris Loader. 2011. « Road transport and climate change: Stepping off the greenhouse gas. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (10): 1020-1030.
- Stern, N et F Calderon. 2014. « Better growth, better climate: The new climate economy report. » *The Global Commission on the Economy and Climate, New York (online: <http://newclimateeconomy/report/>)*.

- Stern, Nicholas. 2007. *The economics of climate change: the Stern review*. : cambridge University press.
- Stops, Vincent. 2014. *How Hackney became London's most liveable borough*. <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/how-hackney-became-london-s-most-liveable-borough>.
- Sun, Guibo, Chris Webster et Alain Chiaradia. 2018. « Ungating the city: A permeability perspective. » *Urban Studies* 55 (12): 2586-2602. doi: 10.1177/0042098017733943.
- Sustrans. 2008. *Take Action on Active Travel*. [https://bettertransport.org.uk/sites/default/files/research-files/Take action on active travel.pdf](https://bettertransport.org.uk/sites/default/files/research-files/Take%20action%20on%20active%20travel.pdf).
- . 2015. « Streets and roads : Sustrans design manual chapter 4. ». [https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/cycling-guidance/sustrans design manual chapter 4 streets and roads.pdf](https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/cycling-guidance/sustrans_design_manual_chapter_4_streets_and_roads.pdf).
- Tal, Gil et Susan Handy. 2012. « Measuring Nonmotorized Accessibility and Connectivity in a Robust Pedestrian Network. » *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2299 (1): 48-56. doi: 10.3141/2299-06.
- TCPA. 2008. Eco-towns transport worksheet. <https://www.tcpa.org.uk/eco-towns-advice-worksheets>.
- Tertoolen, Gerard, Dik Van Kreveld et Ben Verstraten. 1998. « Psychological resistance against attempts to reduce private car use. » *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 32 (3): 171-181.
- Torres, J, M.-S Cloutier, J Bergeron et A St-Denis. 2019. « Des mesures d'apaisement de la circulation aux abords des écoles québécoises : qu'en pensent les enfants? » In *La ville à pied : expériences piétonnes* sous la dir. de Collection Géographie et cultures.
- TRB. 2010. *Driving and the Built Environment: The Effects of Compact Development on Motorized Travel, Energy Use, and CO2 Emissions--Special Report 298*. : National academies press.
- Tremblay, Alex. 2012. « L'avènement de l'automobile au Québec: une petite Révolution tranquille au tournant du XXe siècle. » *Cap-aux-Diamants: la revue d'histoire du Québec* (111): 17-21.
- Tsenkova, Sasha et David Mahalek. 2014. « The impact of planning policies on bicycle-transit integration in Calgary. » *Urban, Planning and Transport Research* 2 (1): 126-146.

- Turcu, Catalina. 2013. « Re-thinking sustainability indicators: local perspectives of urban sustainability. » *Journal of Environmental Planning and Management* 56 (5): 695-719.
- Underwood, Geoffrey, Peter Chapman, Sharon Wright et David Crundall. 1999. « Anger while driving. » *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2 (1): 55-68.
- UNEP. 2011. « Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication. » *Nairobi, Kenya: UNEP*.
- Van Audenhove, François-Joseph, Oleksii Korniiichuk, Laurent Dauby et Jérôme Pourbaix. 2014. « The future of urban mobility 2.0: Imperatives to shape extended mobility ecosystems of tomorrow. ».
- Vasconcellos, Eduardo Alcântara. 2014. *Urban Transport Environment and Equity: The case for developing countries*. : Routledge.
- Vigar, Geoff. 2000. « Local 'barriers' to environmentally sustainable transport planning. » *Local Environment* 5 (1): 19-32.
- Wegener, Michael et Franz Fürst. 2004. « Land-use transport interaction: state of the art. » *Available at SSRN 1434678*.
- Wegman, Fred CM et LT Aarts. 2006. « Advancing sustainable safety: National Road Safety Outlook for 2005-2020. ».
- Wheeler, Stephen M. 2002. « Constructing sustainable development/safeguarding our common future: Rethinking sustainable development. » *American Planning Association Journal of the American Planning Association* 68 (1): 110.
- Wiel, Marc. 1999. « Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales. » *Espace Populations Sociétés* 17 (2): 187-194.
- Williams, Katie. 2017. « Spatial planning, urban form and sustainable transport: An introduction. » In *Spatial Planning, Urban Form and Sustainable Transport*, 15-28. : Routledge.
- Winters, Meghan, Gavin Davidson, Diana Kao et Kay Teschke. 2011. « Motivators and deterrents of bicycling: comparing influences on decisions to ride. » *Transportation* 38 (1): 153-168.
- Winters, Meghan, Kay Teschke, Michael Grant, Eleanor M Setton et Michael Brauer. 2010. « How far out of the way will we travel? Built environment influences on route selection for bicycle and car travel. » *Transportation Research Record* 2190 (1): 1-10.
- Wright, Lloyd et Lewis Fulton. 2005. « Climate change mitigation and transport in developing nations. » *Transport reviews* 25 (6): 691-717.

Wu, Jianguo. 2010. *Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research.* : Springer.

Wu, Jianguo Jingle. 2008. « Making the case for landscape ecology an effective approach to urban sustainability. » *Landscape journal* 27 (1): 41-50.

Zawieska, Jakub et Jana Pieriegud. 2018. « Smart city as a tool for sustainable mobility and transport decarbonisation. » *Transport policy* 63: 39-50.

Zvi, Leve. 2016. « Les rues et les espaces publics comme élan de développement à centre-ville. »
https://ocpm.qc.ca/sites/ocpm.qc.ca/files/pdf/P-83/7.55.1_ruepublique_memoire_strategie-centre-ville.pdf.

ANNEXE 1 : RÉSULTATS DÉSAGRÉGÉS PAR DIMENSION ET MÉTHODE DE TUKEY

Tableau 14. Villes listées en fonction de l'indice de perméabilité filtrée moyen pondéré par la population ambiante et désagrégé par dimensions

Ville	Configuration	Rang	Connectivité	Rang	Densité	Rang	Indice	Rang
<i>Helsinki</i> ^a	0,44	3	0,21	6	2,37	1	1,01	1
<i>Oslo</i> ^a	0,57	2	0,22	4	1,35	2	0,71	2
<i>Fribourg</i>	0,42	4	0,19	8	1,16	3	0,59	3
<i>Brême</i> ^a	0,34	8	0,13	23	1,07	4	0,51	4
<i>Houten</i>	0,58	1	0,34	1	0,60	15	0,51	5
<i>Anvers</i> ^a	0,31	10	0,24	3	0,96	5	0,50	6
<i>Malmö</i>	0,29	13	0,20	7	0,95	6	0,48	7
<i>Groningue</i>	0,41	6	0,22	5	0,73	9	0,45	8
<i>Münster</i>	0,25	18	0,18	11	0,86	7	0,43	9
<i>Utrecht</i> ^a	0,41	5	0,33	2	0,52	17	0,42	10
<i>Ljubljana</i> ^a	0,28	14	0,14	18	0,74	8	0,39	11
<i>Strasbourg</i> ^a	0,27	16	0,13	24	0,71	11	0,37	12
<i>Amsterdam</i> ^a	0,30	11	0,15	15	0,64	14	0,36	13
<i>Vienne</i> ^a	0,28	15	0,15	14	0,65	13	0,36	14
<i>Copenhague</i> ^a	0,17	30	0,11	35	0,73	10	0,34	15
<i>Maastricht</i>	0,34	7	0,15	16	0,51	18	0,33	16
<i>Berlin</i> ^a	0,21	24	0,10	36	0,65	12	0,32	17
<u>Bogota</u> ^a	0,32	9	0,18	10	0,44	23	0,31	18
<u>Calgary</u>	0,29	12	0,18	9	0,44	21	0,31	19
<i>Hambourg</i> ^a	0,18	26	0,12	26	0,57	16	0,29	20
<i>Bordeaux</i> ^a	0,25	19	0,16	13	0,43	24	0,28	21
<i>Barcelone</i> ^a	0,21	21	0,14	17	0,46	20	0,27	22
<i>Paris</i> ^a	0,21	22	0,14	21	0,44	22	0,26	23
<i>Taipei</i> ^a	0,22	20	0,16	12	0,40	25	0,26	24
<u>Ottawa</u>	0,17	34	0,10	37	0,47	19	0,25	25
Melbourne	0,18	27	0,12	30	0,40	26	0,23	26
<u>Rio De Janeiro</u>	0,27	17	0,11	32	0,26	30	0,21	27
<u>Edmonton</u>	0,17	33	0,11	33	0,35	27	0,21	28
Brisbane	0,17	29	0,12	29	0,31	28	0,20	29
<u>Mexico</u>	0,21	23	0,14	19	0,21	37	0,19	30
<i>Séoul</i>	0,17	31	0,12	27	0,22	33	0,17	31
<i>Tokyo</i> ^a	0,18	28	0,12	28	0,20	40	0,17	32
<u>Santiago</u>	0,18	25	0,12	31	0,19	41	0,16	33
<u>Buenos Aires</u>	0,15	38	0,09	41	0,24	31	0,16	34
<i>Hong Kong</i>	0,17	32	0,07	48	0,22	32	0,16	35
Christchurch	0,11	51	0,05	56	0,31	29	0,15	36
<u>Québec</u>	0,16	35	0,10	39	0,20	38	0,15	37
<u>San Francisco</u>	0,13	45	0,14	20	0,17	44	0,14	38
<u>Montréal</u> ^a	0,15	39	0,10	40	0,19	42	0,14	39
<i>Pékin</i>	0,15	37	0,13	25	0,14	48	0,14	40
<i>Kyoto</i>	0,15	36	0,05	53	0,22	35	0,14	41
<u>Portland</u>	0,14	42	0,11	34	0,17	46	0,14	42
<u>Toronto</u>	0,11	50	0,09	43	0,21	36	0,13	43
<i>Shanghai</i>	0,14	41	0,13	22	0,13	53	0,13	44
<i>Jérusalem</i>	0,13	43	0,05	52	0,22	34	0,13	45
<u>Denver</u>	0,10	53	0,09	44	0,17	43	0,12	46

<u>Lima</u>	0,14	40	0,08	45	0,14	49	0,12	47
Sydney	0,09	55	0,06	51	0,20	39	0,12	48
<u>Boston</u>	0,11	52	0,09	42	0,14	50	0,11	49
<u>Sao Paulo</u>	0,13	46	0,08	47	0,14	51	0,11	50
<u>Seattle</u>	0,11	48	0,10	38	0,12	55	0,11	51
<u>Sacramento</u>	0,13	44	0,07	49	0,13	52	0,11	52
Auckland	0,09	56	0,06	50	0,17	45	0,11	53
<u>Vancouver</u> ^a	0,09	57	0,05	54	0,16	47	0,10	54
<u>Los Angeles</u>	0,12	47	0,08	46	0,10	56	0,10	55
<u>Phoenix</u>	0,10	54	0,05	55	0,10	57	0,08	56
Erevan	0,09	58	0,05	57	0,08	59	0,07	57
<u>Quito</u>	0,11	49	-0,02	60	0,12	54	0,07	58
Manille	0,06	59	0,03	58	0,09	58	0,06	59
La Havane	0,04	60	-0,01	59	0,03	60	0,02	60

Villes asiatiques; Villes d'Amérique centrale et du Sud; Villes européennes; Villes d'Amérique du Nord; **Villes océaniques**. ^a Villes du top 20 de l'indice Copenhagénise de 2019.

Tableau 15. Comparaisons multiples des moyennes par la méthode de Tukey (niveau de confiance de 95%)

Région I	Région II	Moyenne I	Moyenne II	Diff.	P
Amérique du Nord	Amérique centrale et du Sud	0,150	0,146	-0,003	0,999
Asie	Amérique centrale et du Sud	0,144	0,146	-0,003	0,999
Europe	Amérique centrale et du Sud	0,438	0,146	0,291	<0,001
Océanie	Amérique centrale et du Sud	0,162	0,146	0,015	0,999
Asie	Amérique du Nord	0,144	0,150	-0,006	0,999
Europe	Amérique du Nord	0,438	0,150	0,288	<0,001
Océanie	Amérique du Nord	0,162	0,150	0,012	0,999
Europe	Asie	0,438	0,144	0,294	<0,001
Océanie	Asie	0,162	0,144	0,018	0,999
Océanie	Europe	0,162	0,438	-0,276	<0,001

Anova : $F(4,55) = 20.87, p < 0.001, \eta^2 = 0.603$

ANNEXE 2 : CARTES DES VILLES

La valeur de l'indice de perméabilité filtré calculé à partir des cellules du jeu de données *LandScan* dans les 60 villes sélectionnées est présenté dans les figures suivantes. Les résultats ont été classés en 5 quantiles. Une carte générale des villes produite avec les données d'OSM ainsi que la population ambiante sur 24 heures par cellule sont également présentées pour permettre une appréciation générale de la morphologie urbaine et de la répartition de la population sur le territoire. De plus, les centres-villes ont été localisés grâce aux données de *simplemaps* (*simplemaps* 2020). Enfin, le nombre de cellules, la valeur moyenne pondérée de l'indice de perméabilité filtré et le rang de la ville sont présentés dans le titre de chaque figure.

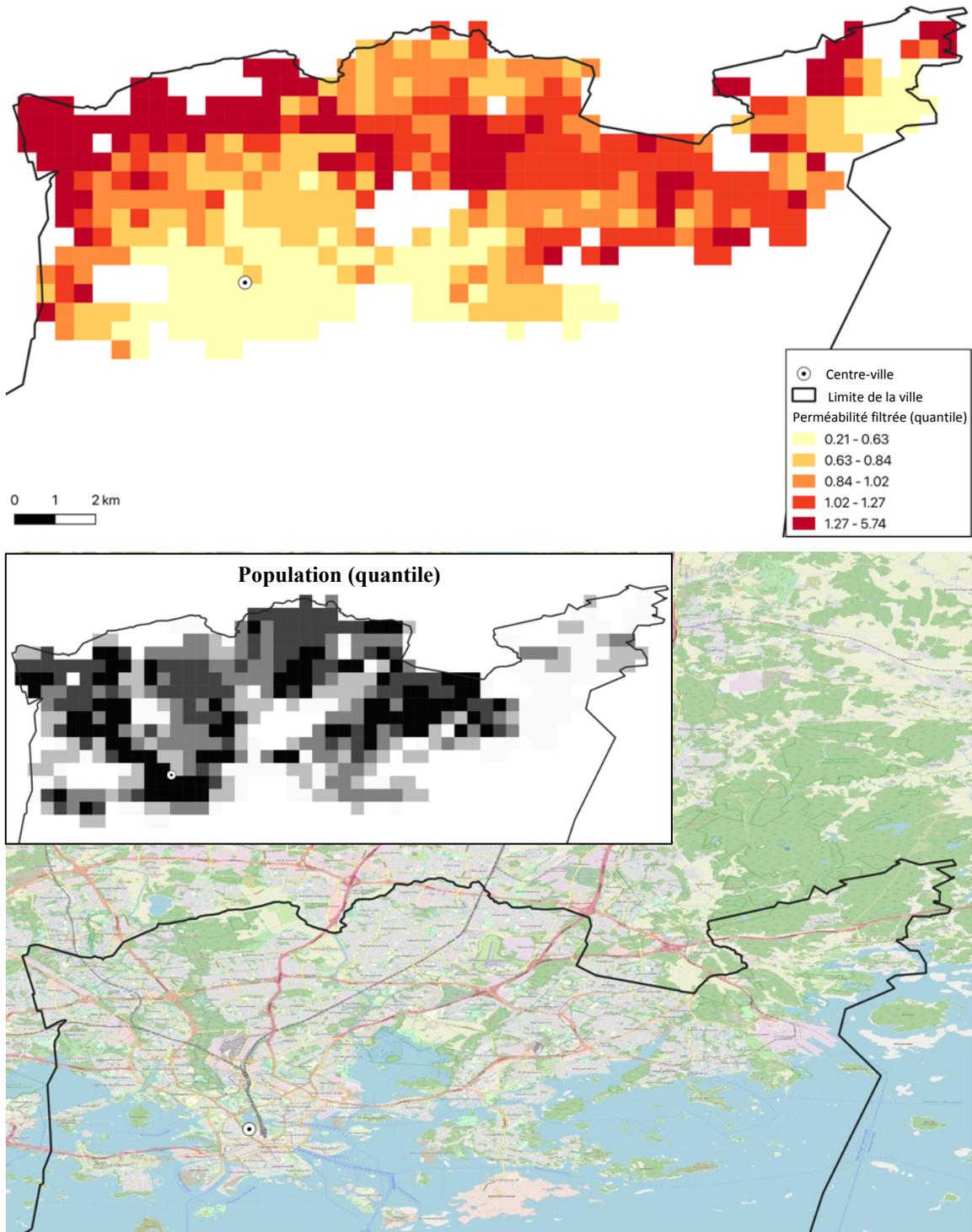


Figure 22. Perméabilité filtrée, Helsinki (n = 494 ; moyenne = 1,01 ; rang = 1/60)

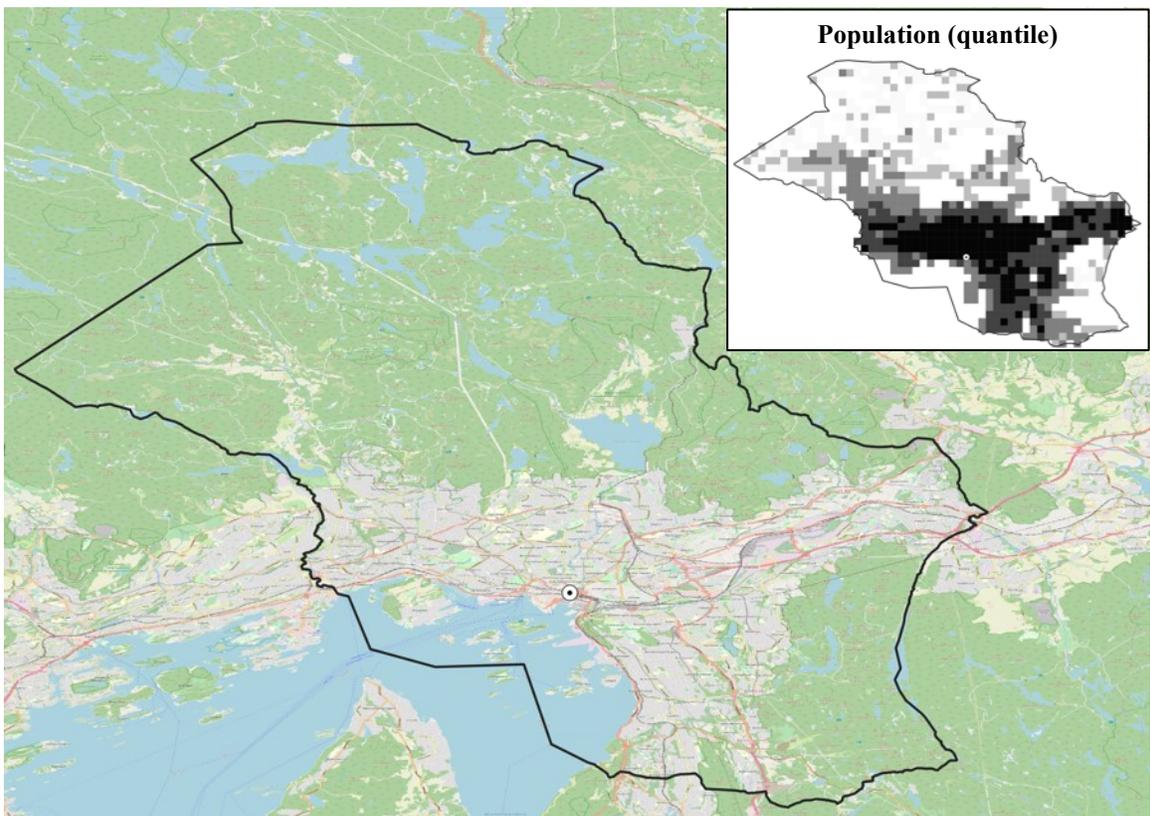
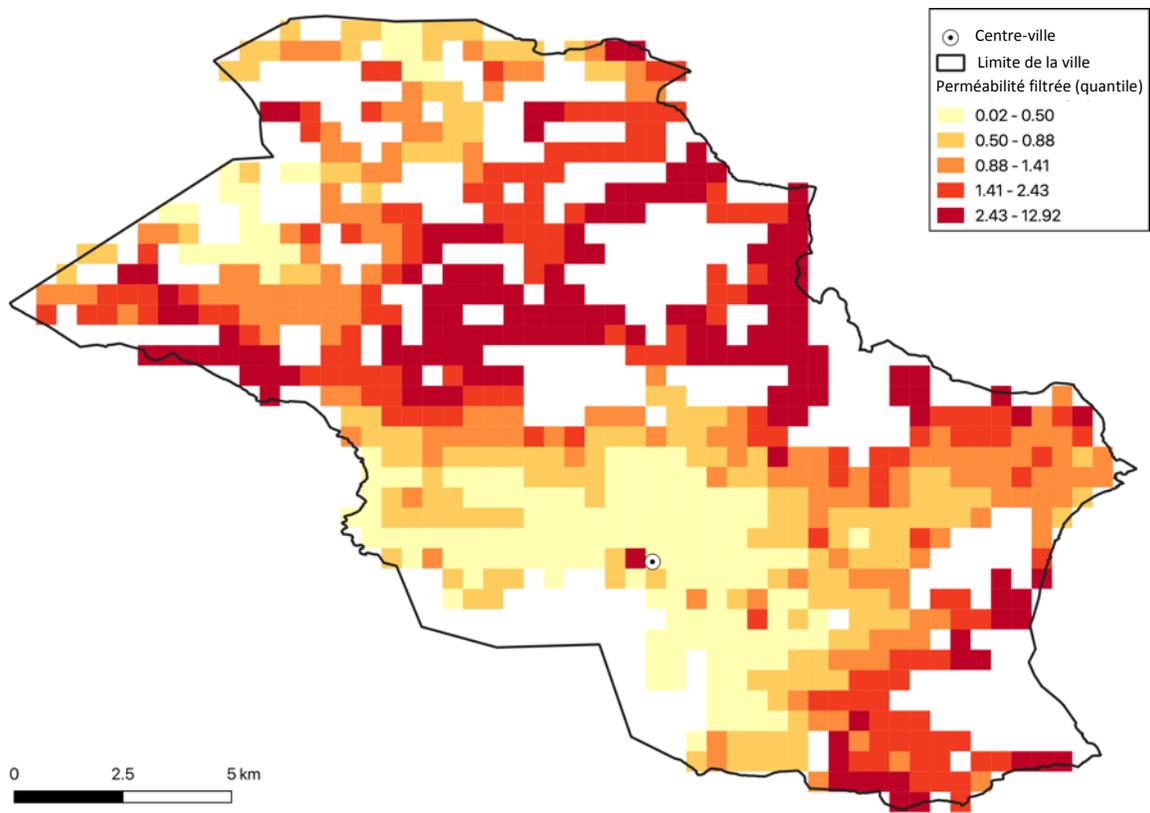


Figure 23. Perméabilité filtrée, Oslo (n = 764 ; moyenne = 0,71 ; rang = 2/60)

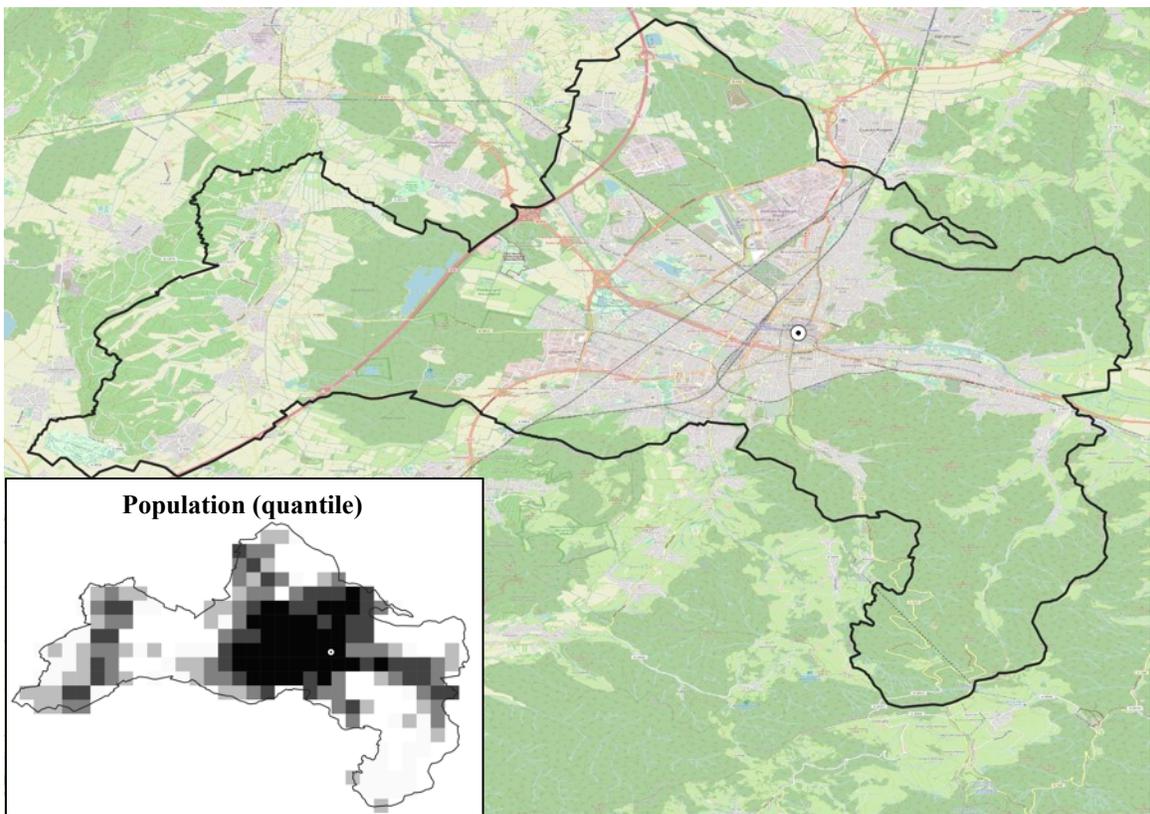
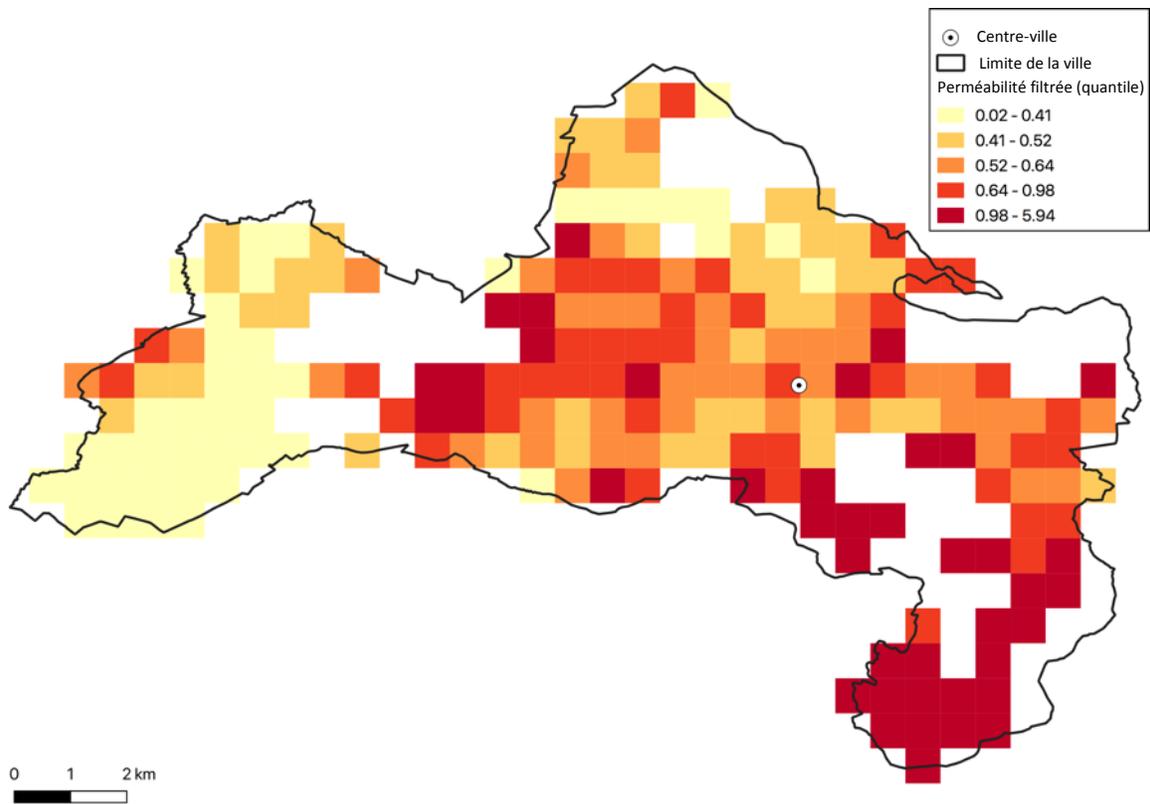


Figure 24. Perméabilité filtrée, Fribourg (n = 206 ; moyenne = 0,59 ; rang = 3/60)

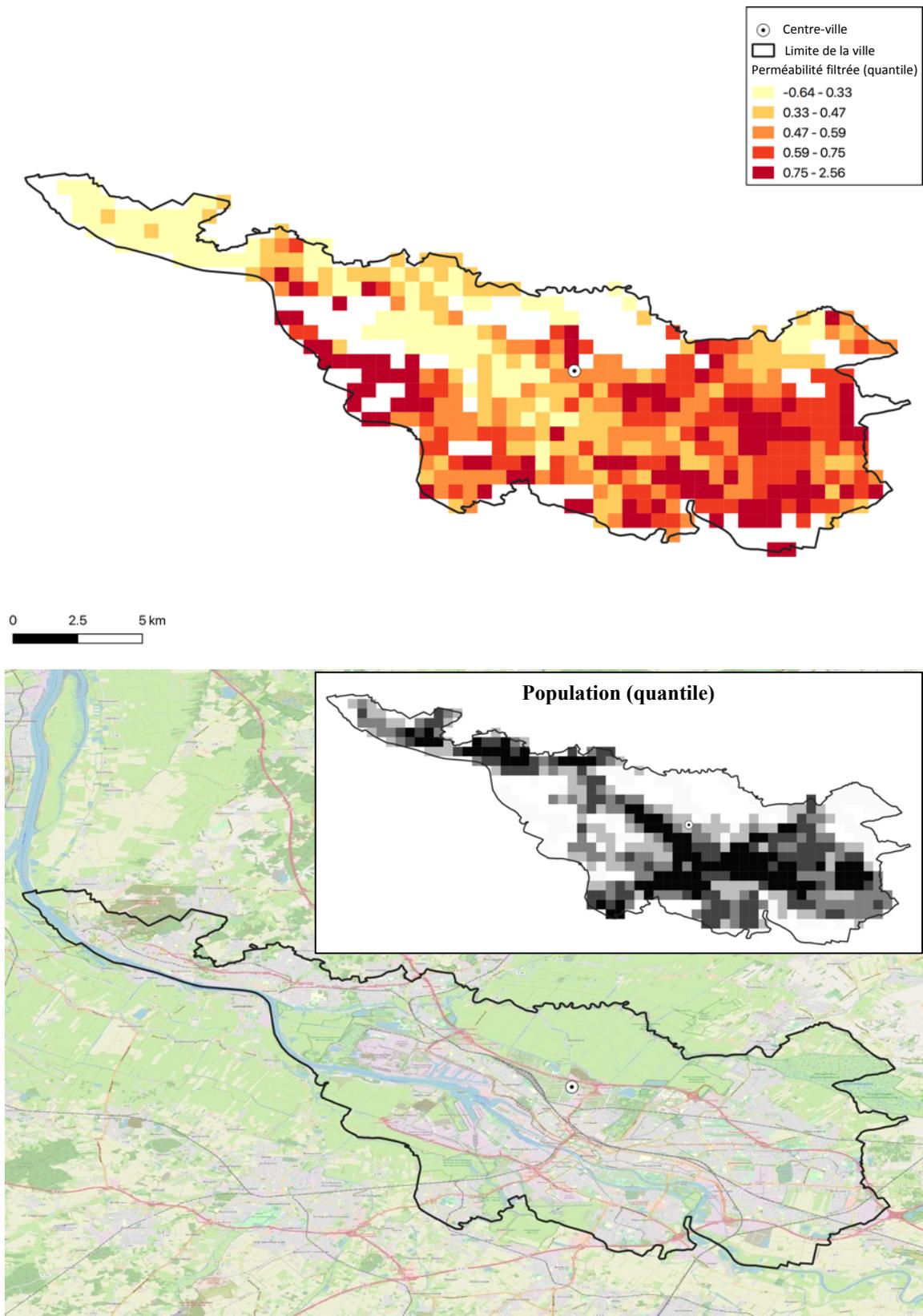


Figure 25. Perméabilité filtrée, Brême (n = 507 ; moyenne = 0,51 ; rang = 4/60)

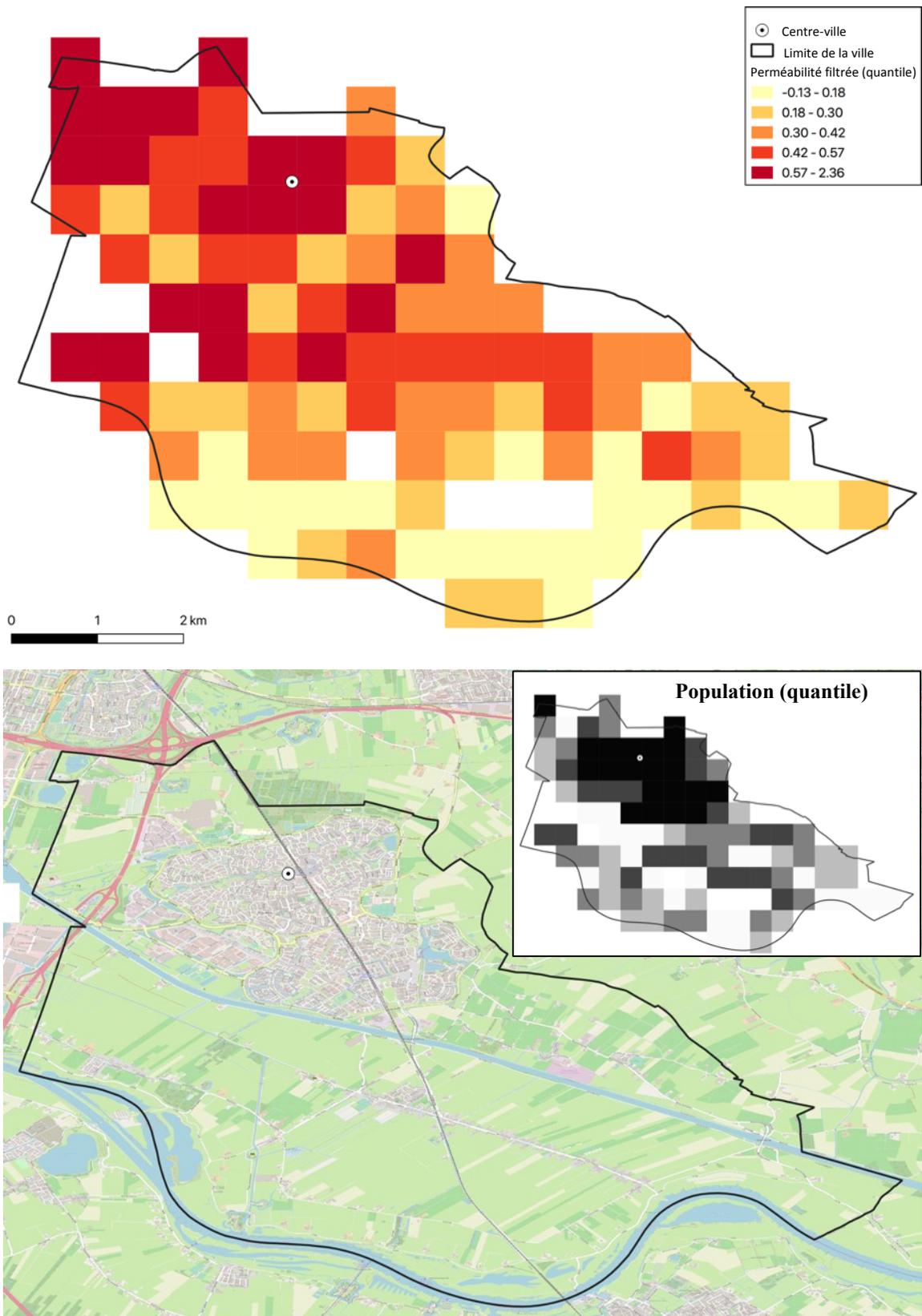


Figure 26. Perméabilité filtrée, Houten (n = 101 ; moyenne = 0,51 ; rang = 5/60)

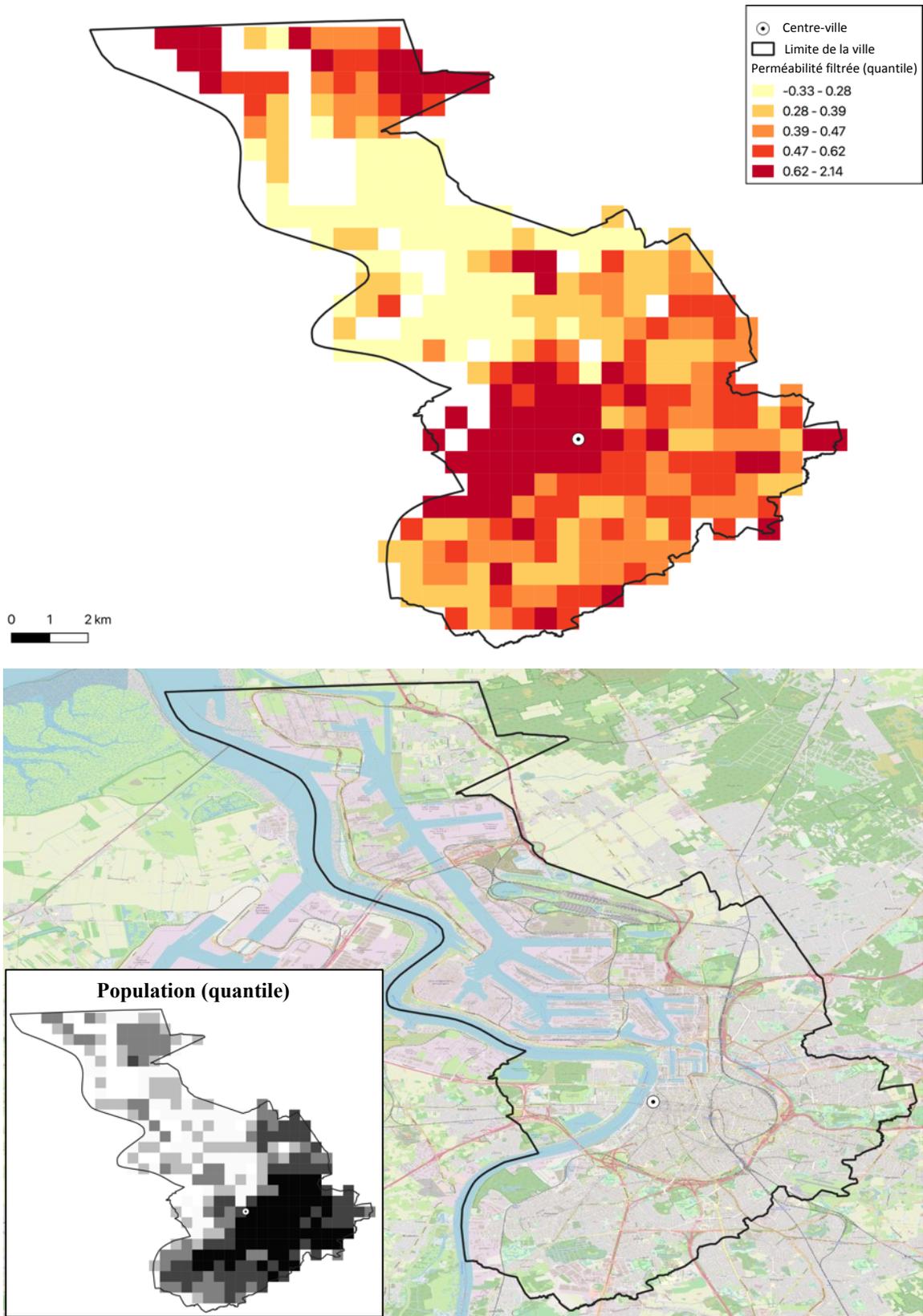


Figure 27. Perméabilité filtrée, Anvers (n = 326 ; moyenne = 0,50 ; rang = 6/60)

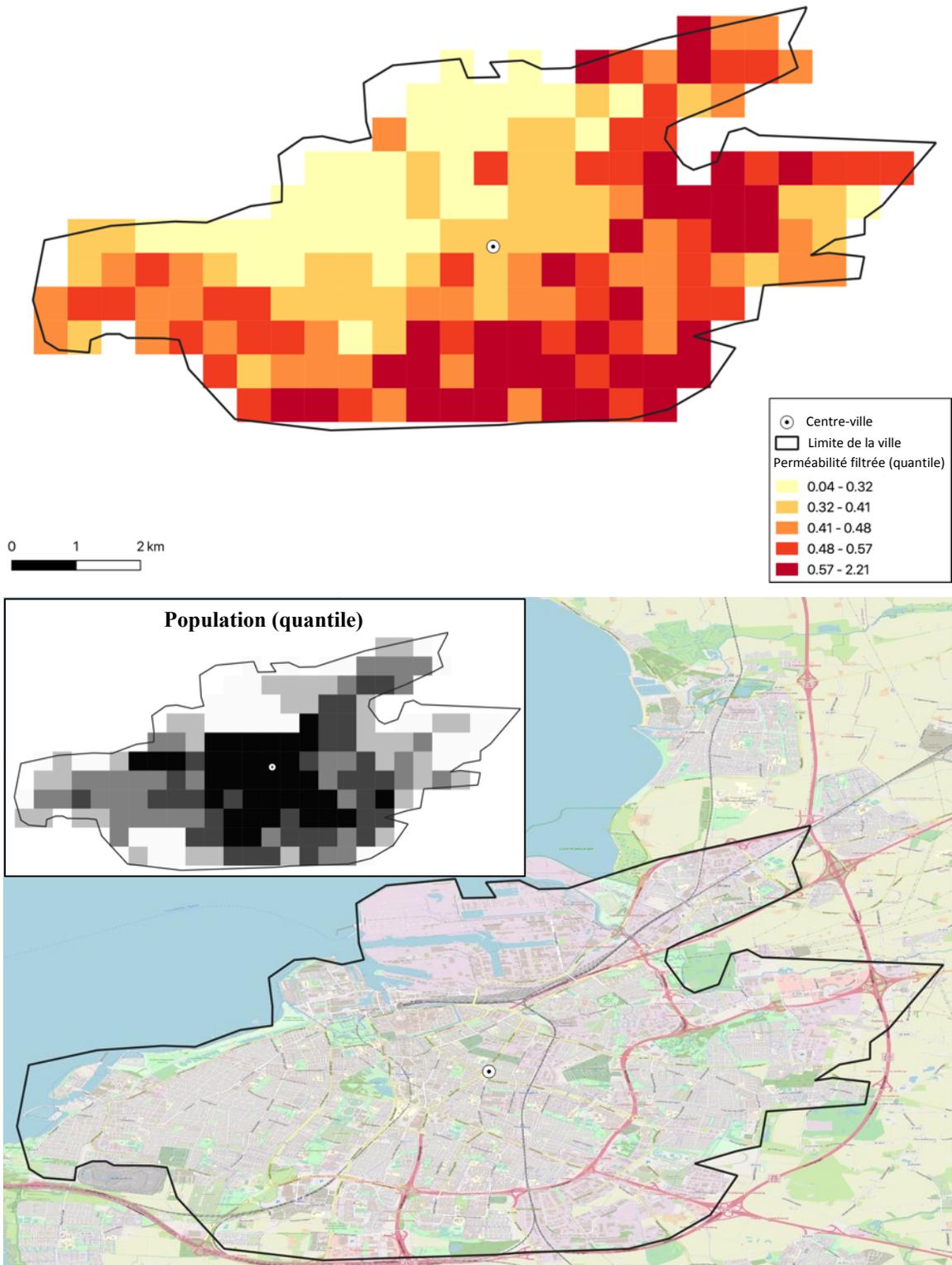


Figure 28. Perméabilité filtrée, Malmö (n = 180 ; moyenne = 0,48 ; rang = 7/60)

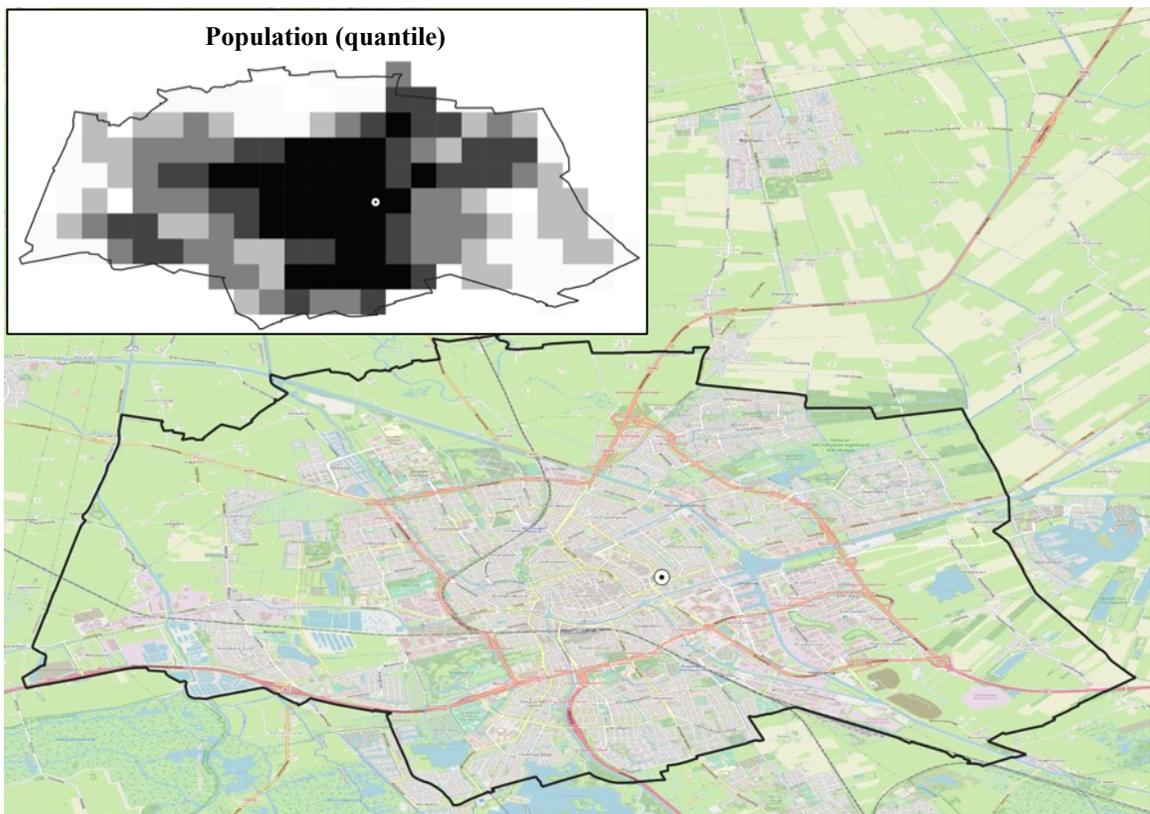
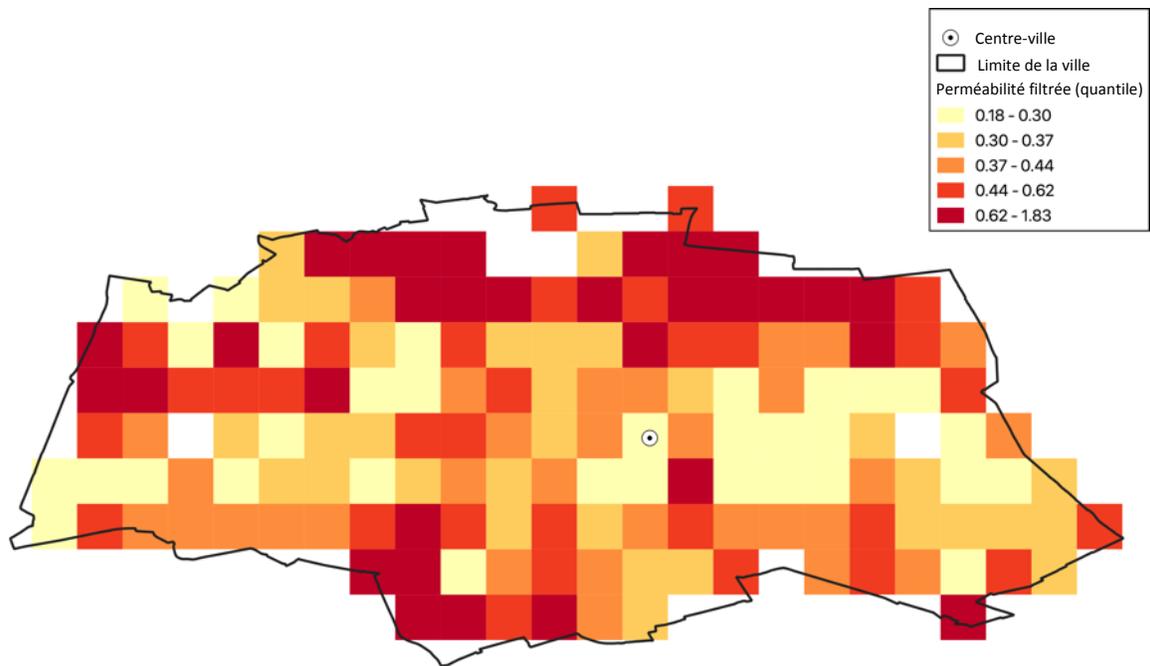


Figure 29. Perméabilité filtrée, Groningue (n = 156 ; moyenne = 0,45 ; rang = 8/60)

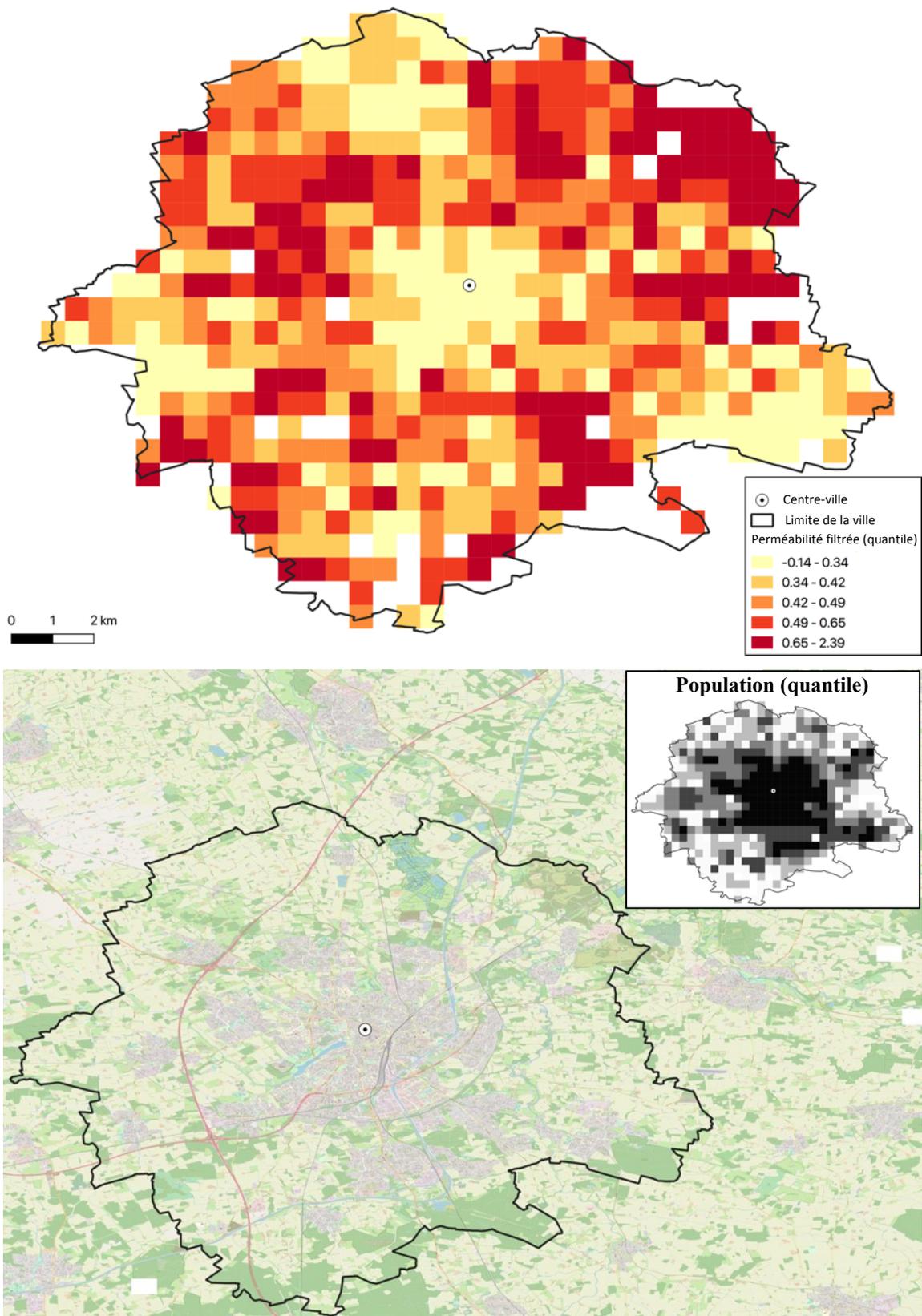


Figure 30. Perméabilité filtrée, Münster (n = 530 ; moyenne = 0,43 ; rang = 9/60)

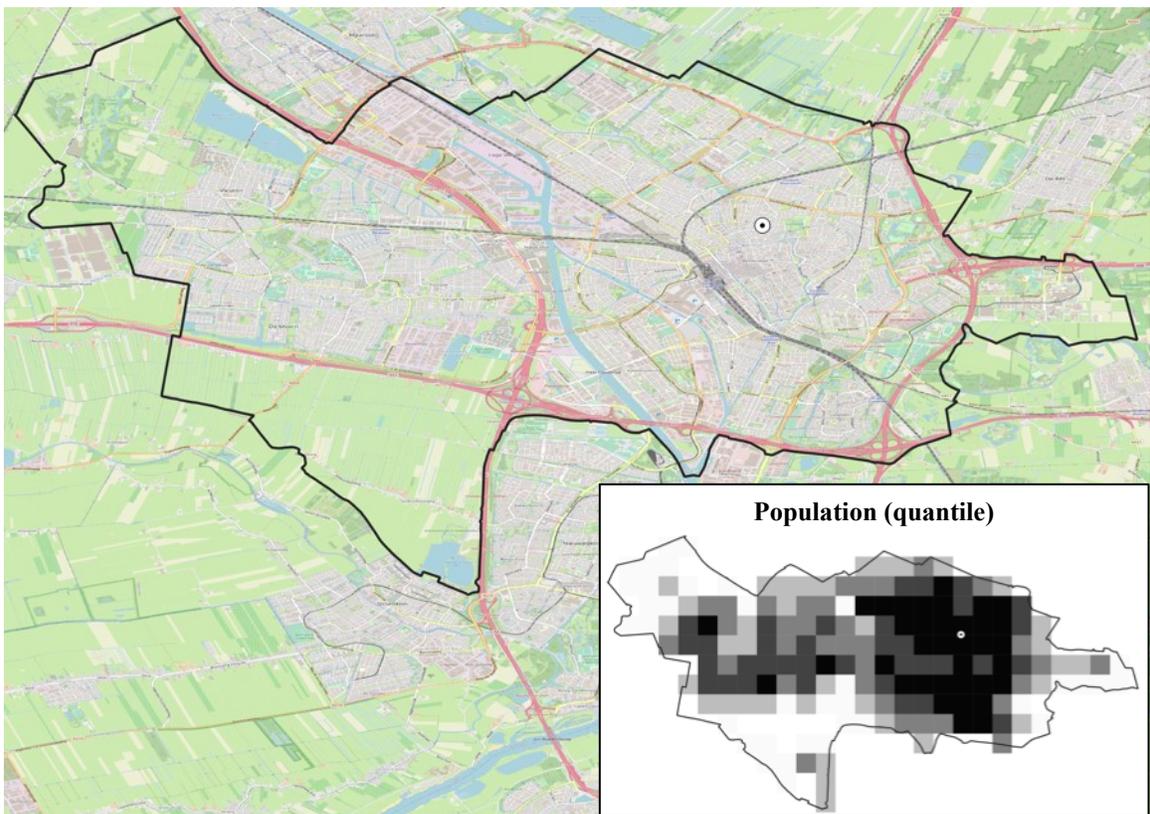
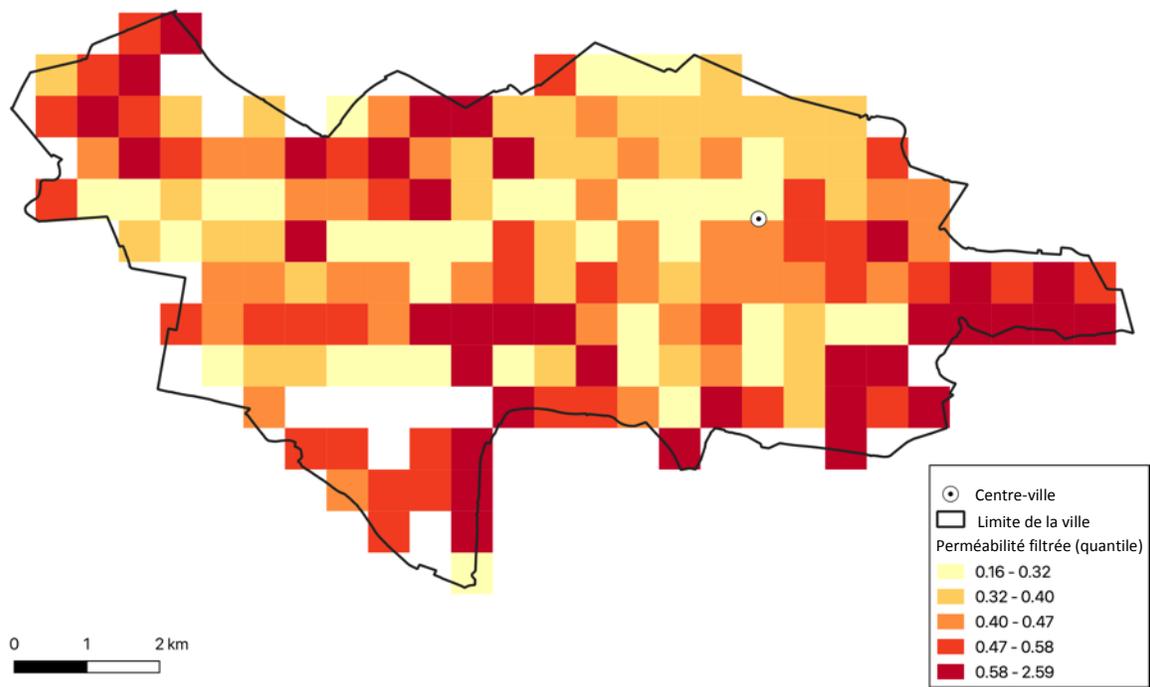


Figure 31. Perméabilité filtrée, Utrecht (n = 177 ; moyenne = 0,42 ; rang = 10/60)

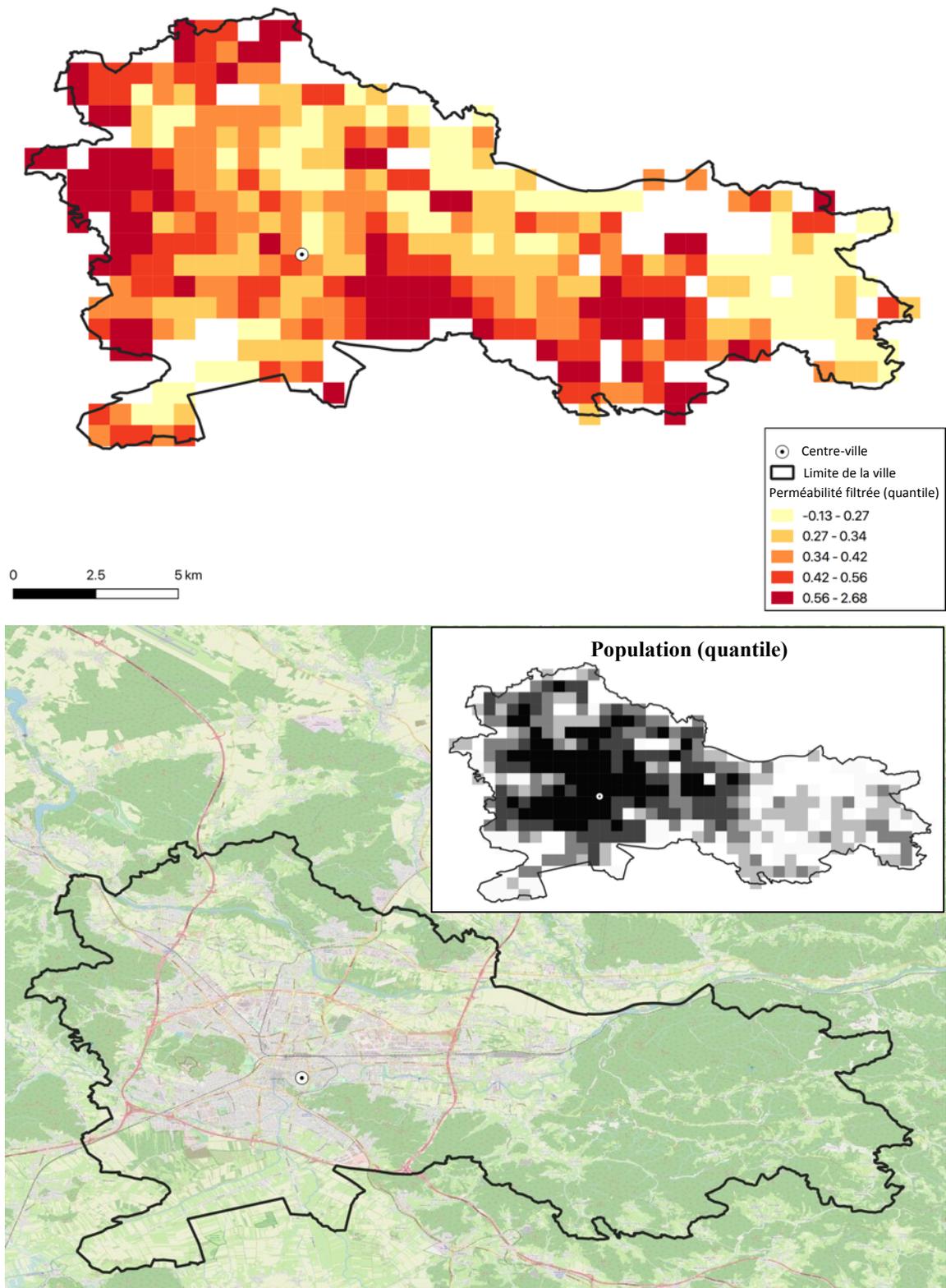


Figure 32. Perméabilité filtrée, Ljubljana (n = 394 ; moyenne = 0,39 ; rang = 11/60)

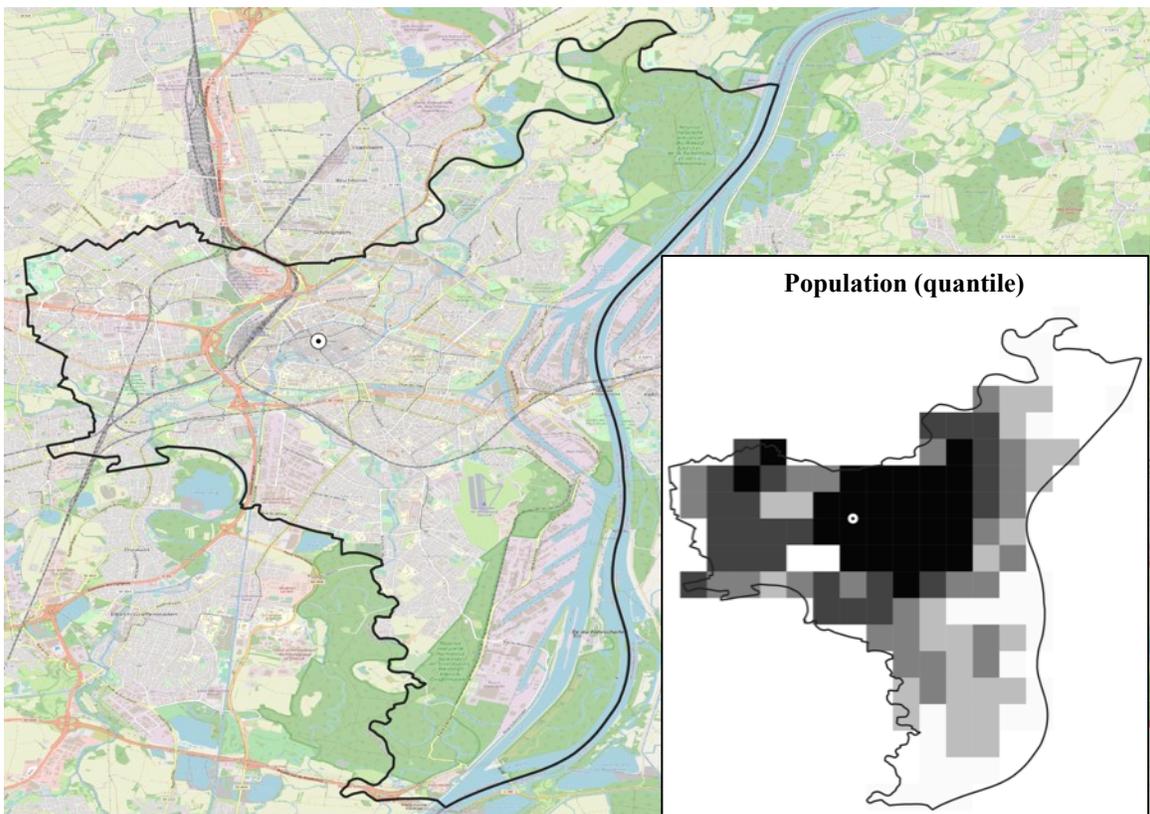
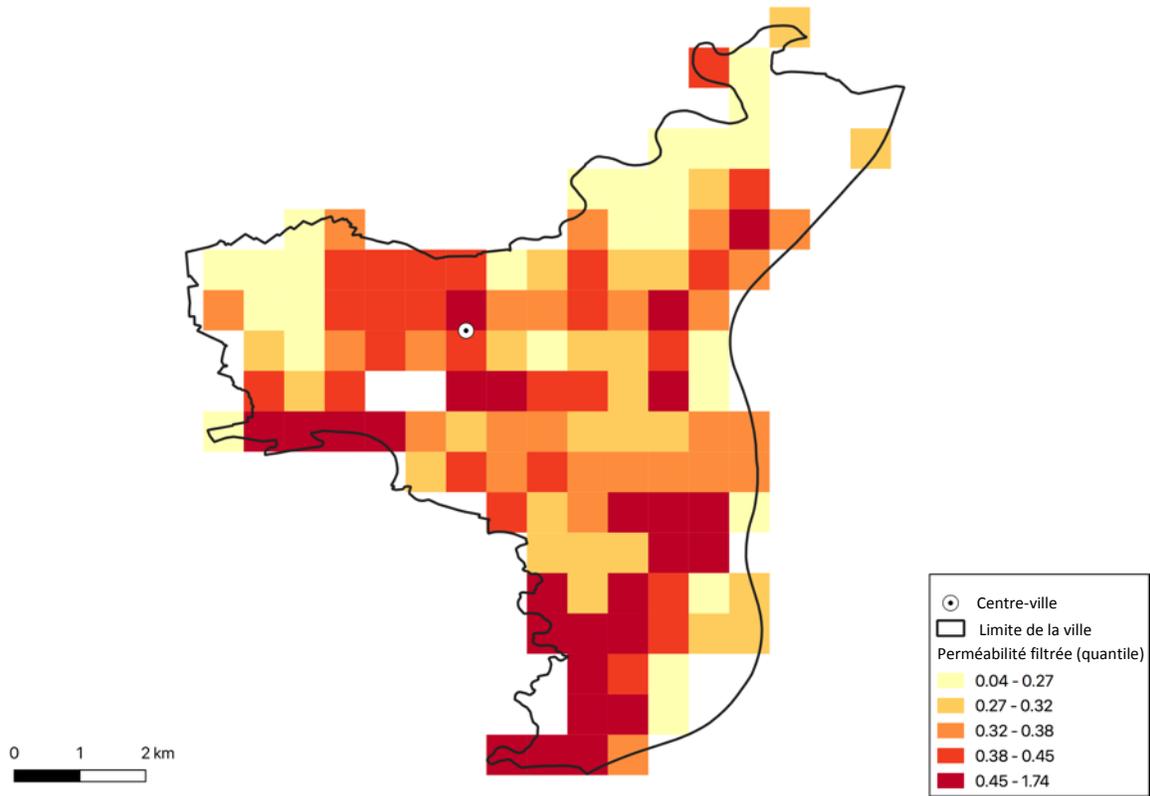


Figure 33. Perméabilité filtrée, Strasbourg (n = 127 ; moyenne = 0,37 ; rang = 12/60)

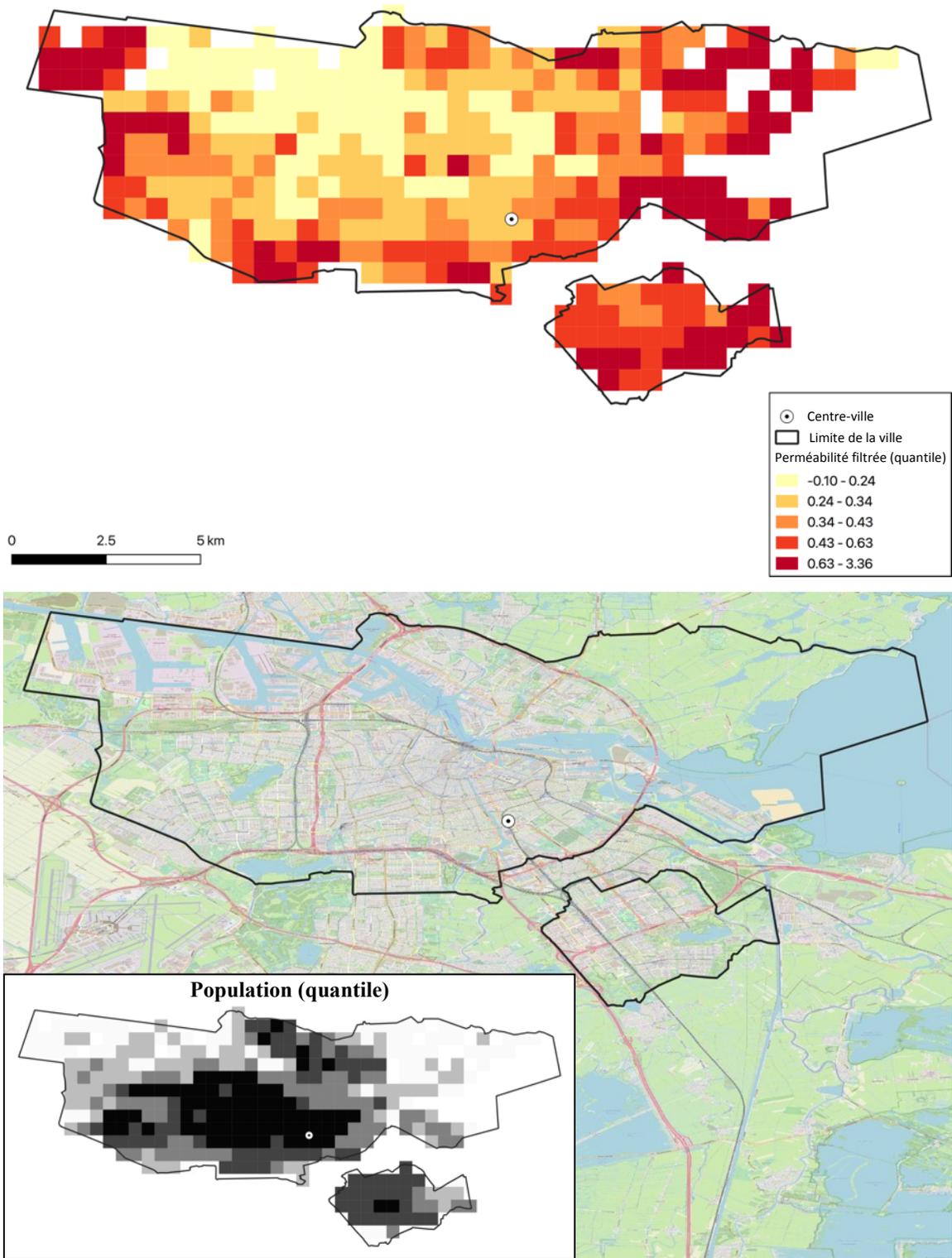


Figure 34. Perméabilité filtrée, Amsterdam (n = 364 ; moyenne = 0,36 ; rang = 13/60)

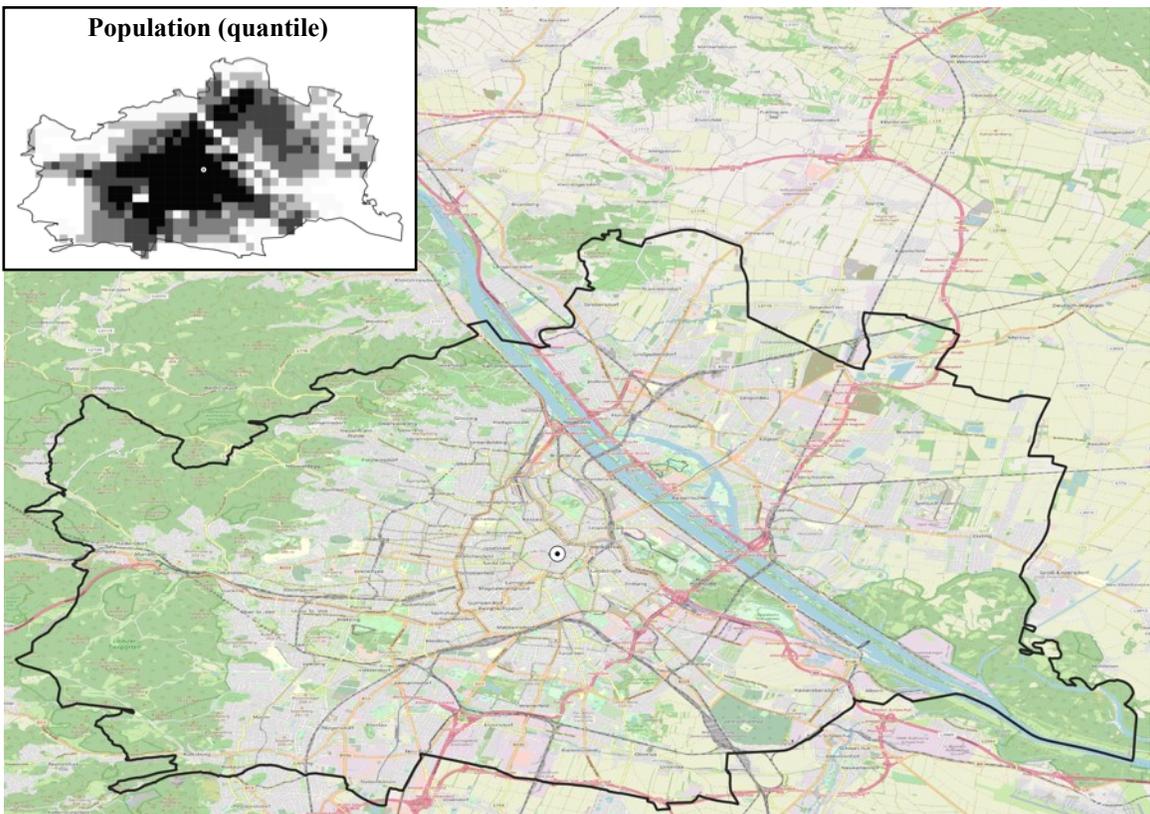
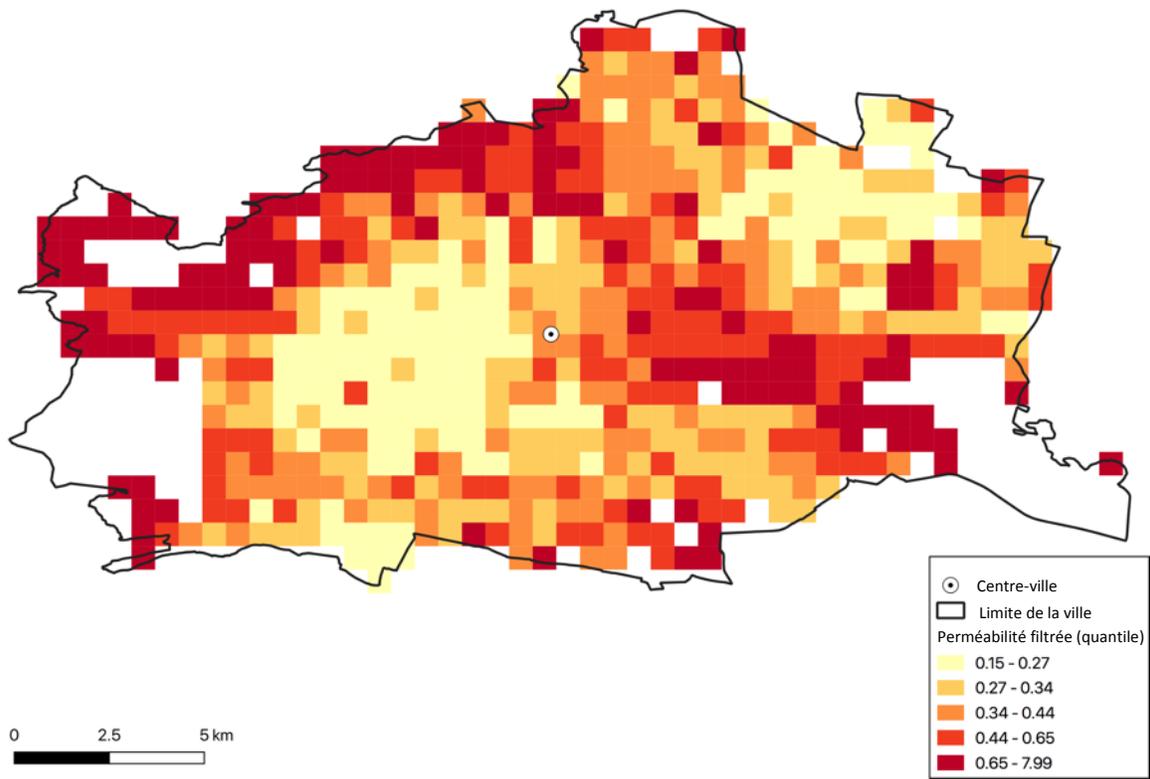


Figure 35. Perméabilité filtrée, Vienne (n = 620 ; moyenne = 0,36 ; rang = 14/60)

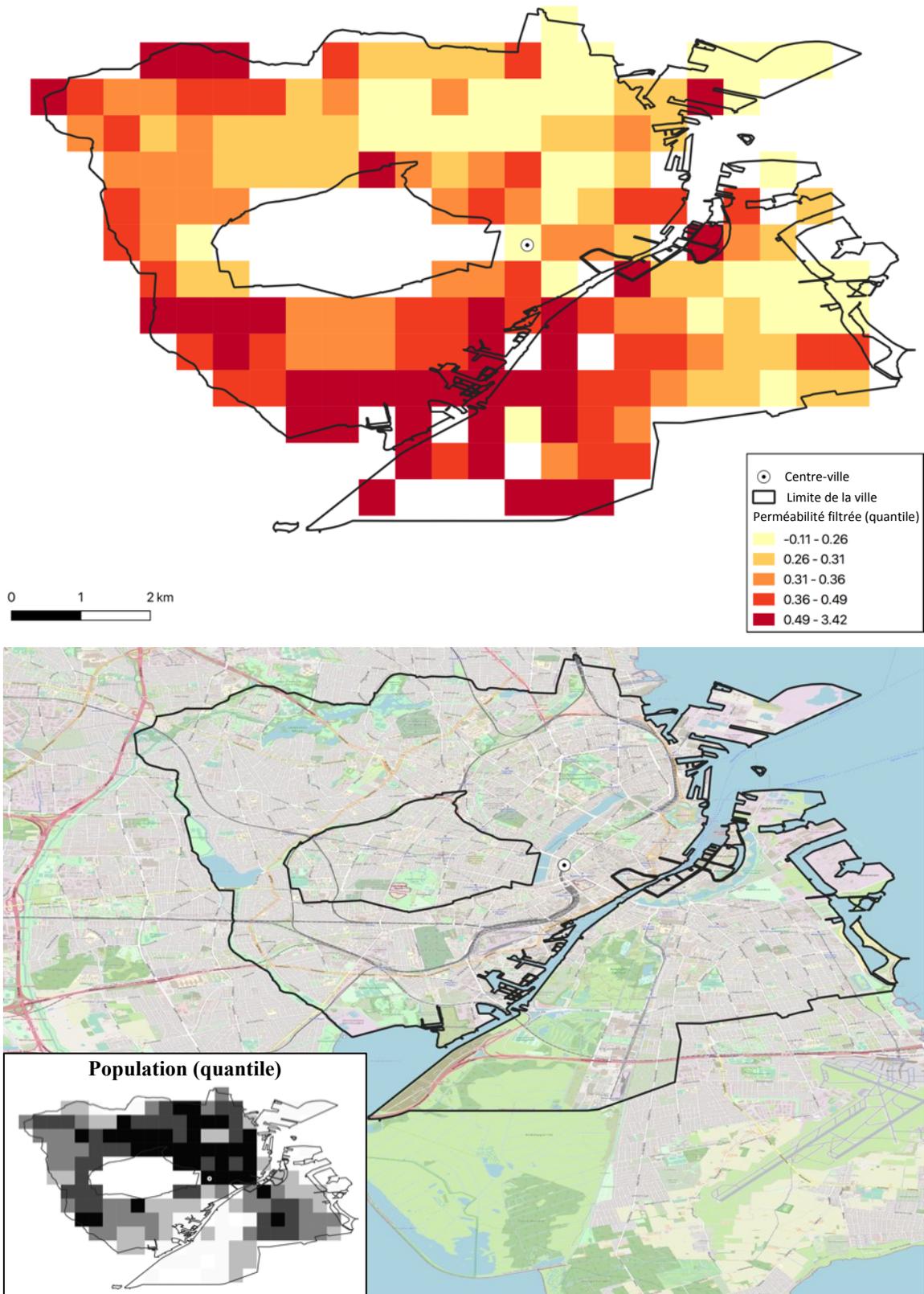


Figure 36. Perméabilité filtrée, Copenhague (n = 179 ; moyenne = 0,34 ; rang = 15/60)

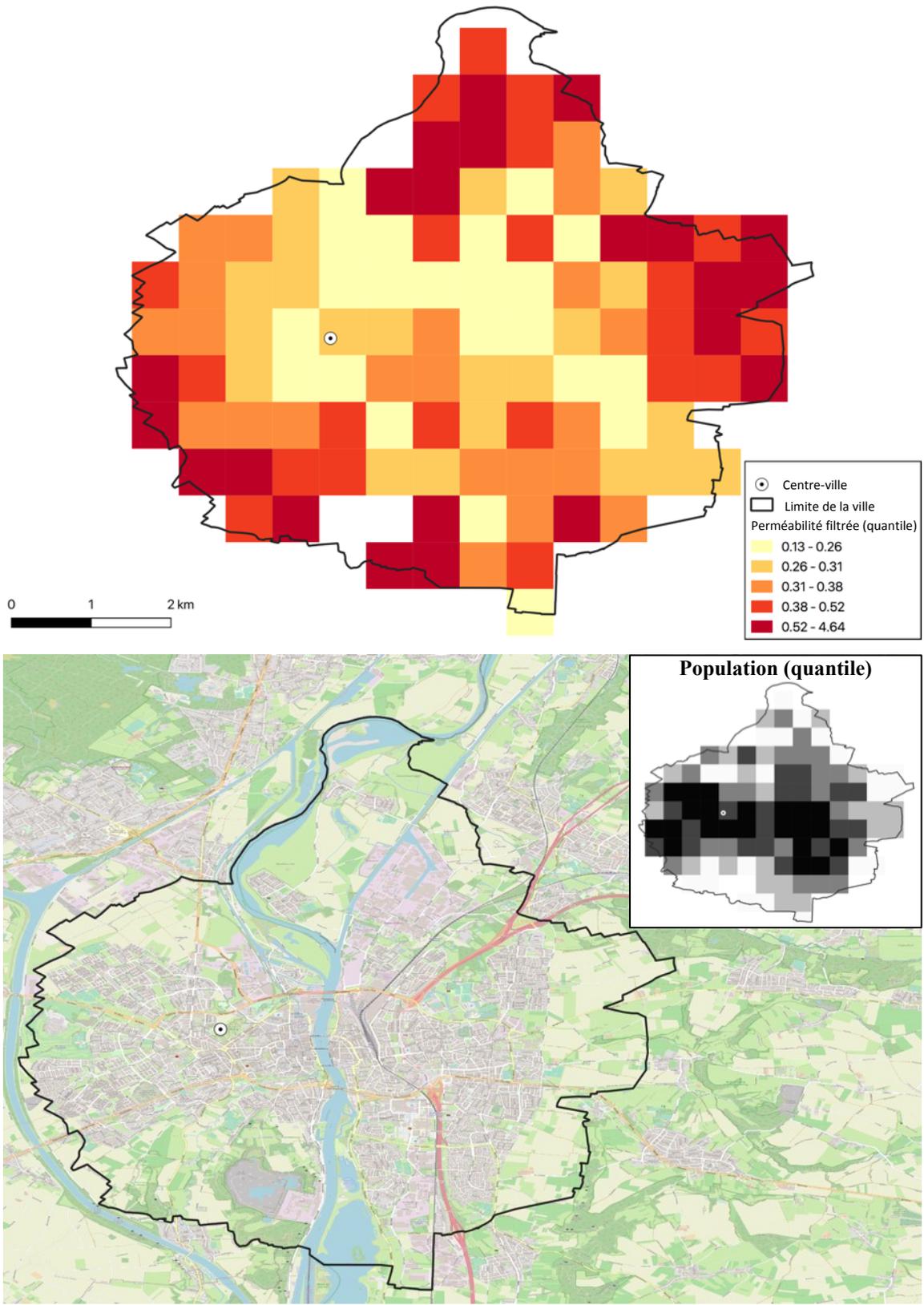


Figure 37. Perméabilité filtrée, Maastricht (n = 108 ; moyenne = 0,33 ; rang = 16/60)

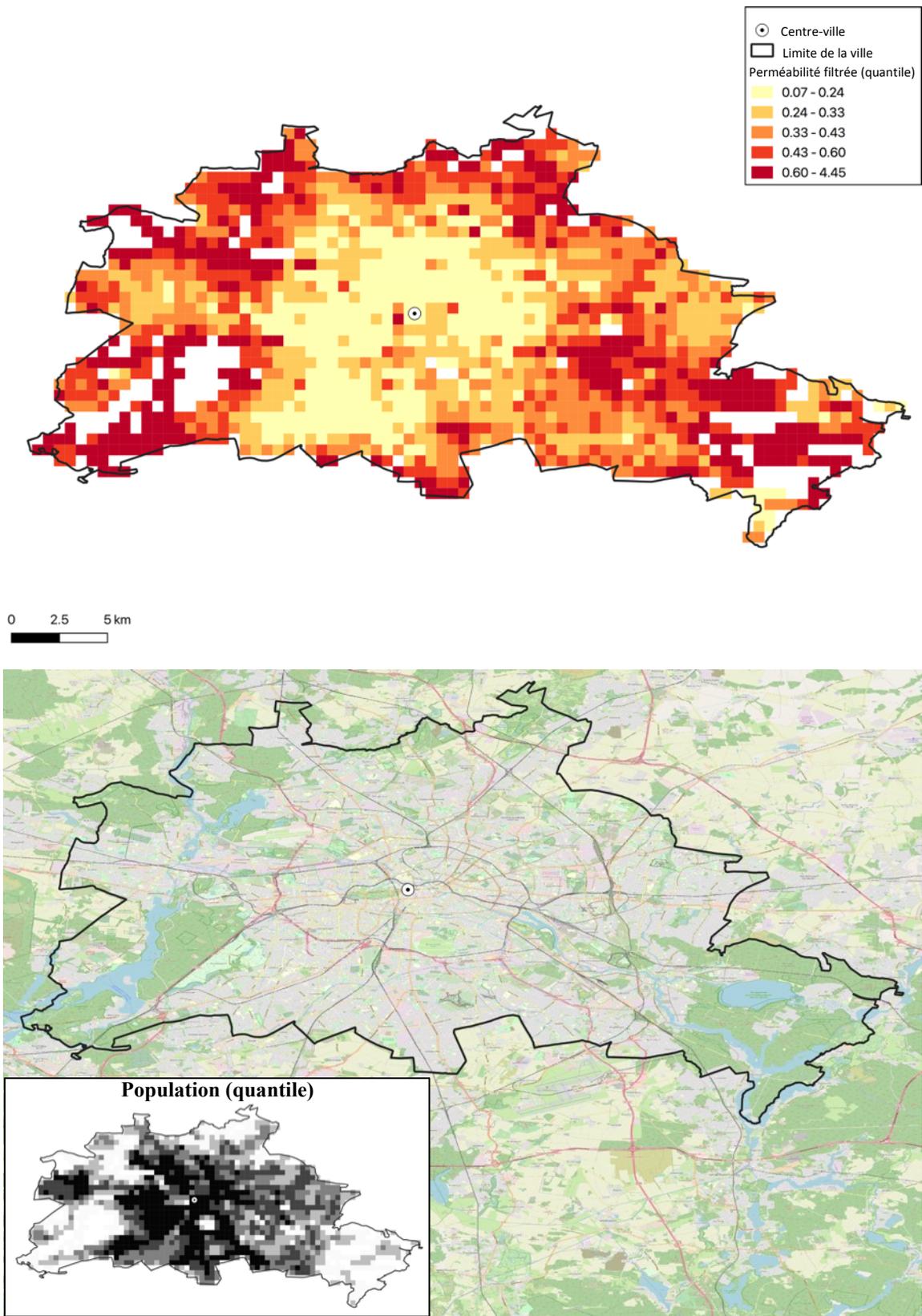


Figure 38. Perméabilité filtrée, Berlin (n = 1541 ; moyenne = 0,32 ; rang = 17/60)

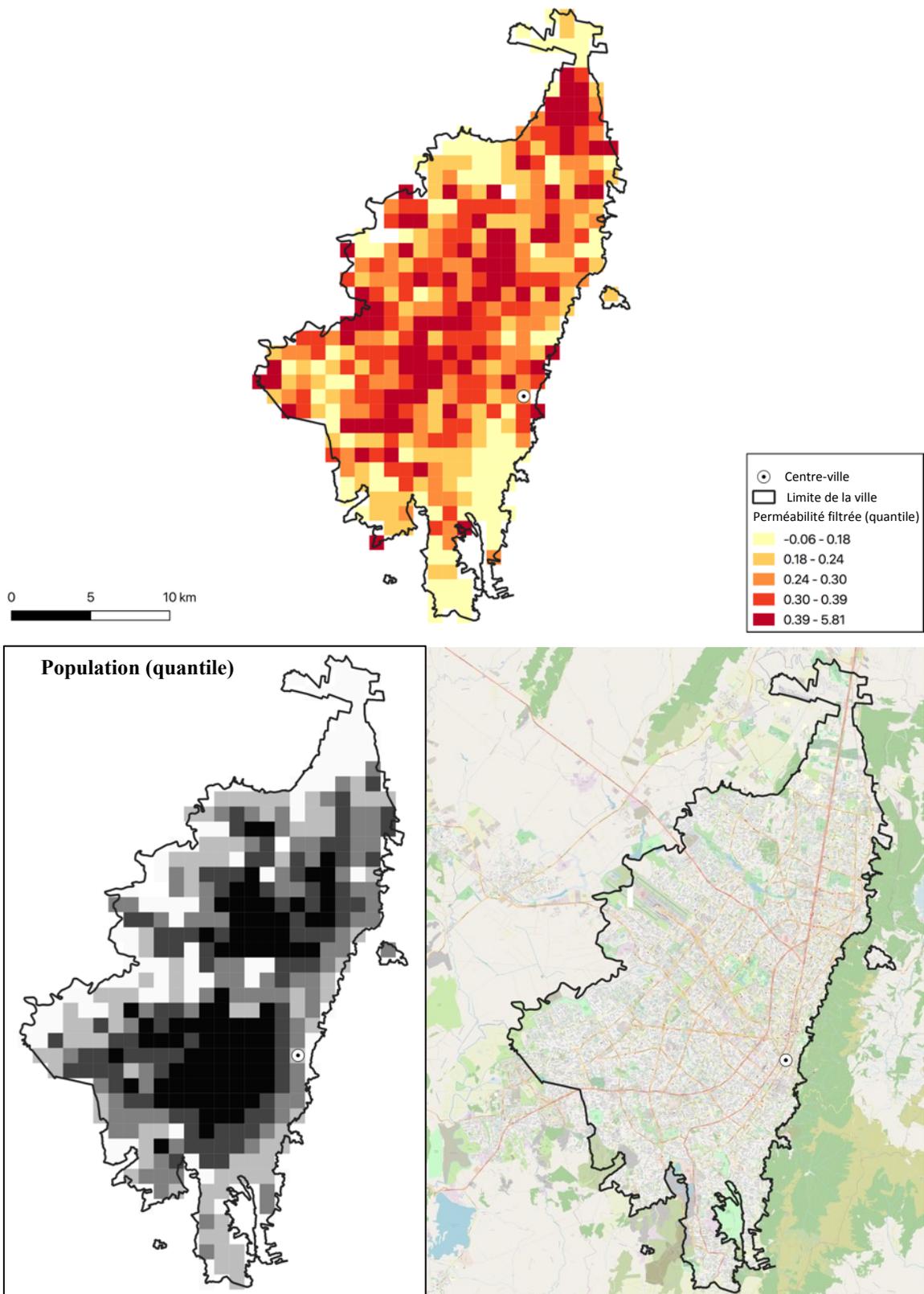


Figure 39. Perméabilité filtrée, Bogota (n = 449 ; moyenne = 0,31 ; rang = 18/60)

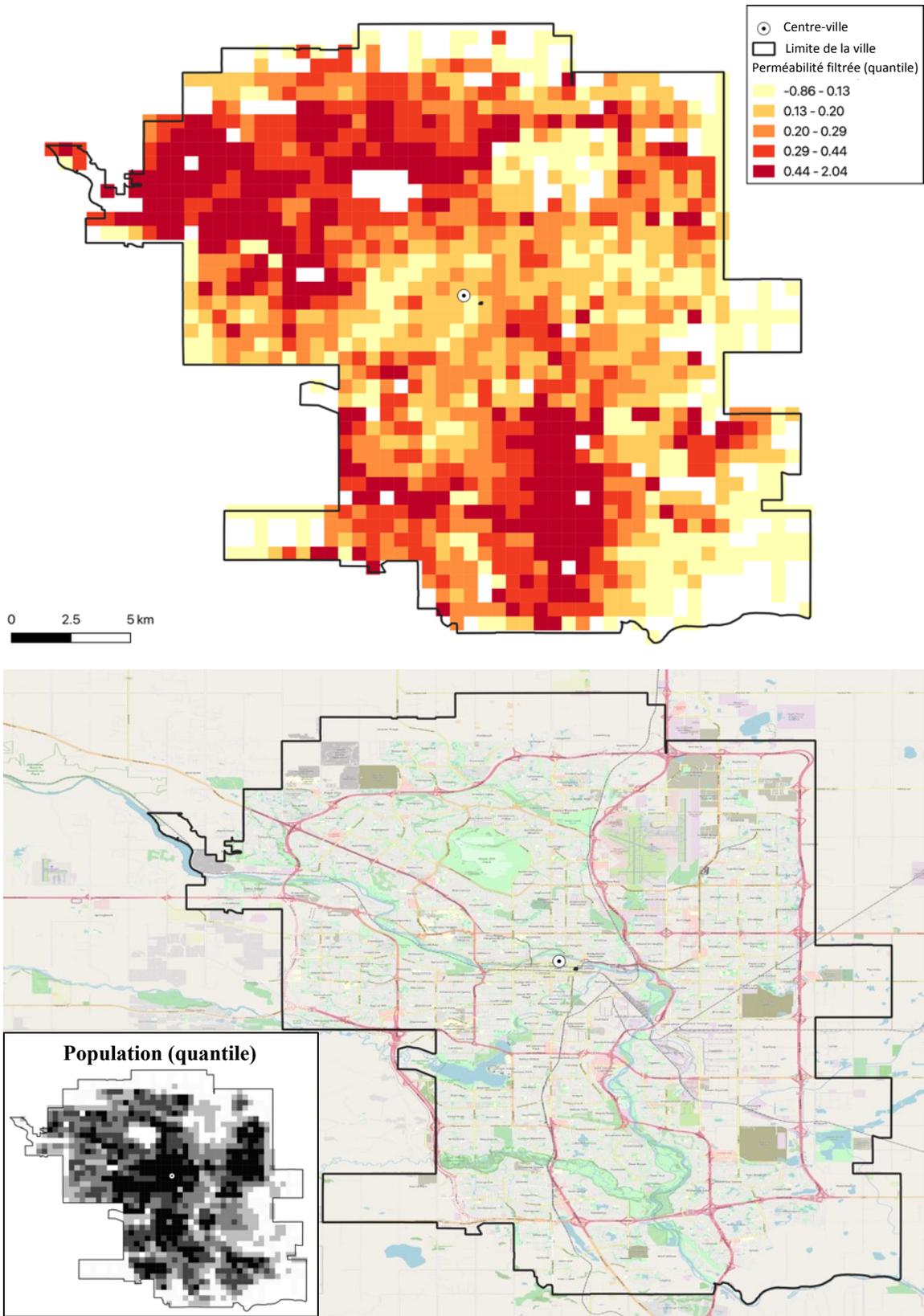


Figure 40. Perméabilité filtrée, Calgary (n = 1383 ; moyenne = 0,31 ; rang = 19/60)

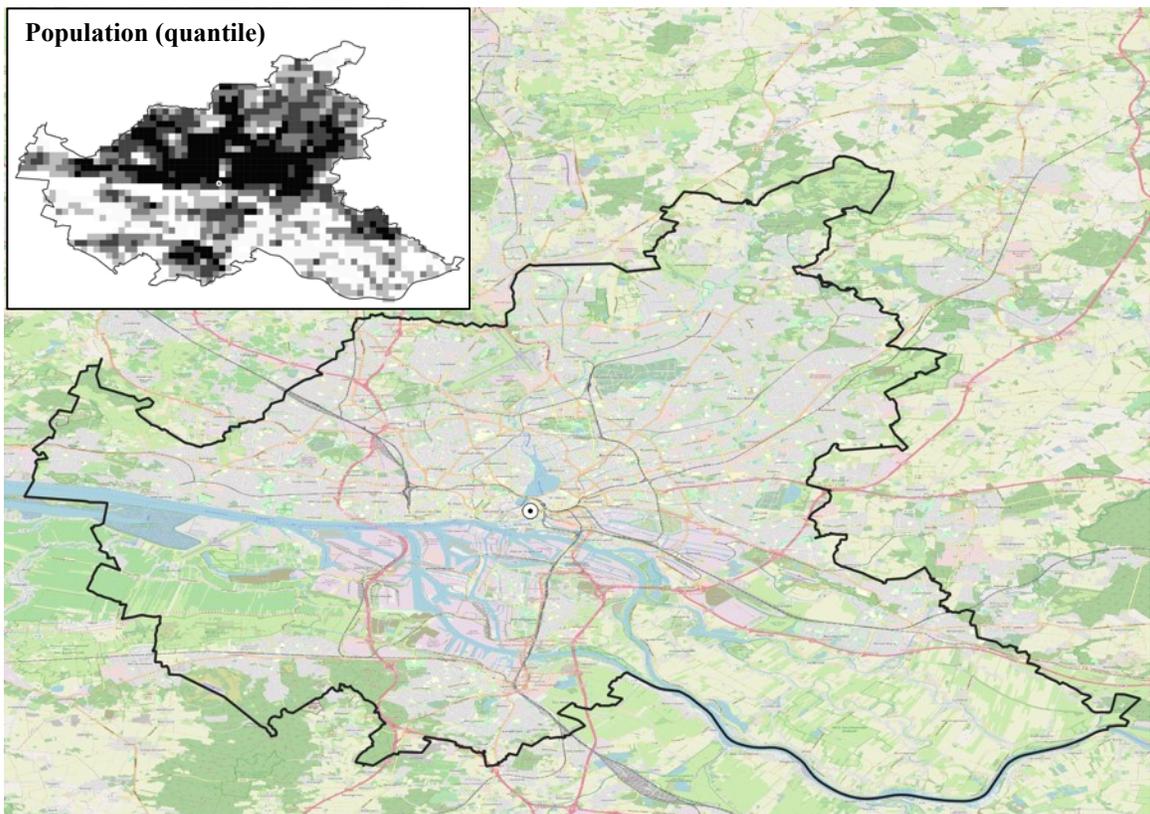
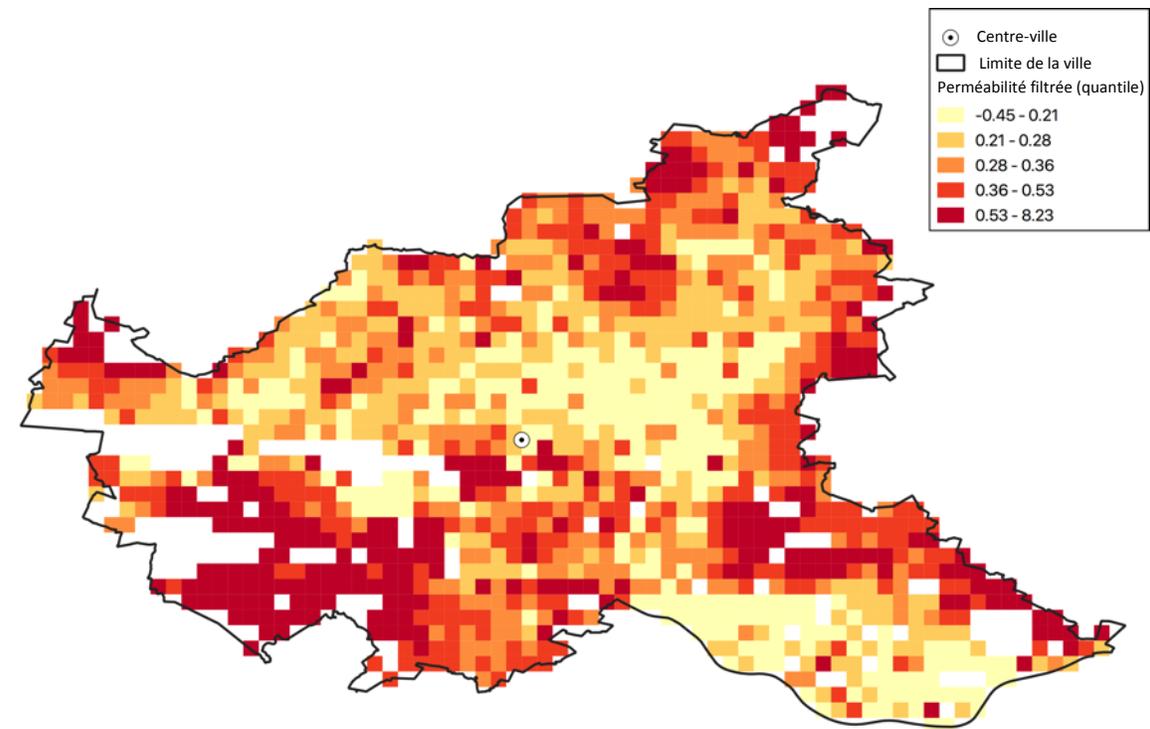


Figure 41. Perméabilité filtrée, Hambourg (n = 1287 ; moyenne = 0,29 ; rang = 20/60)

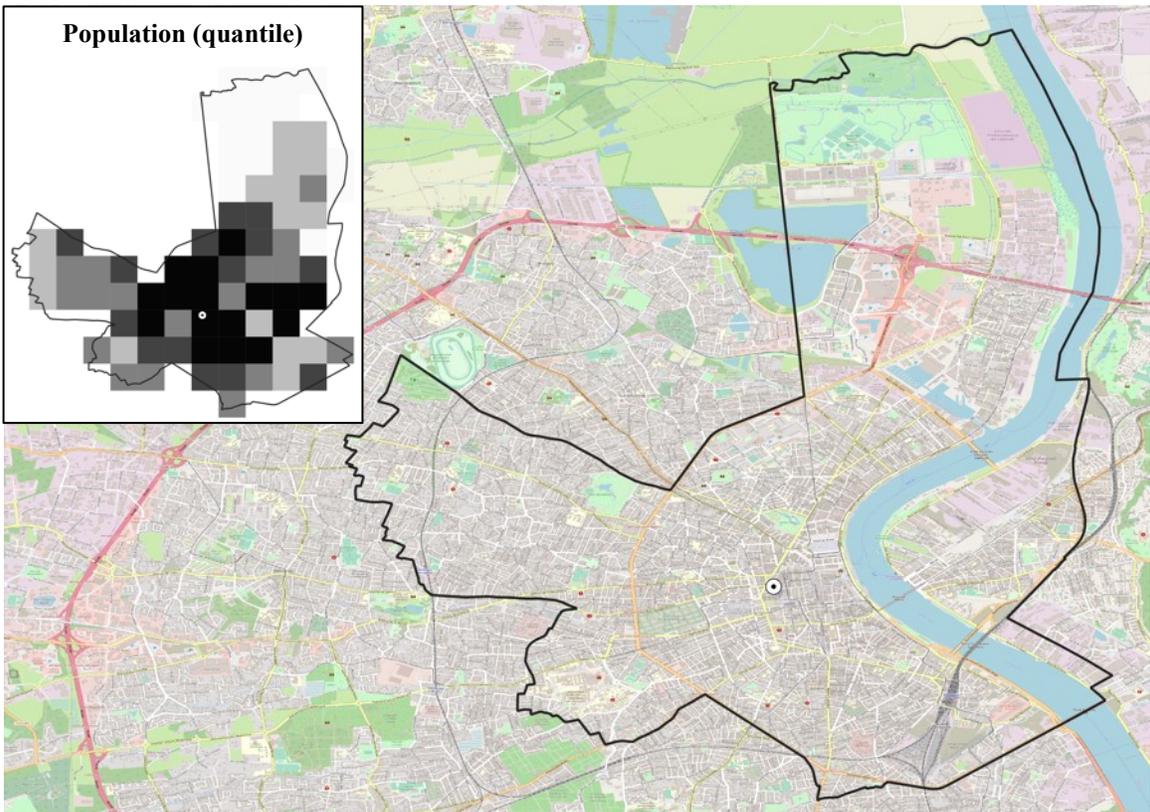
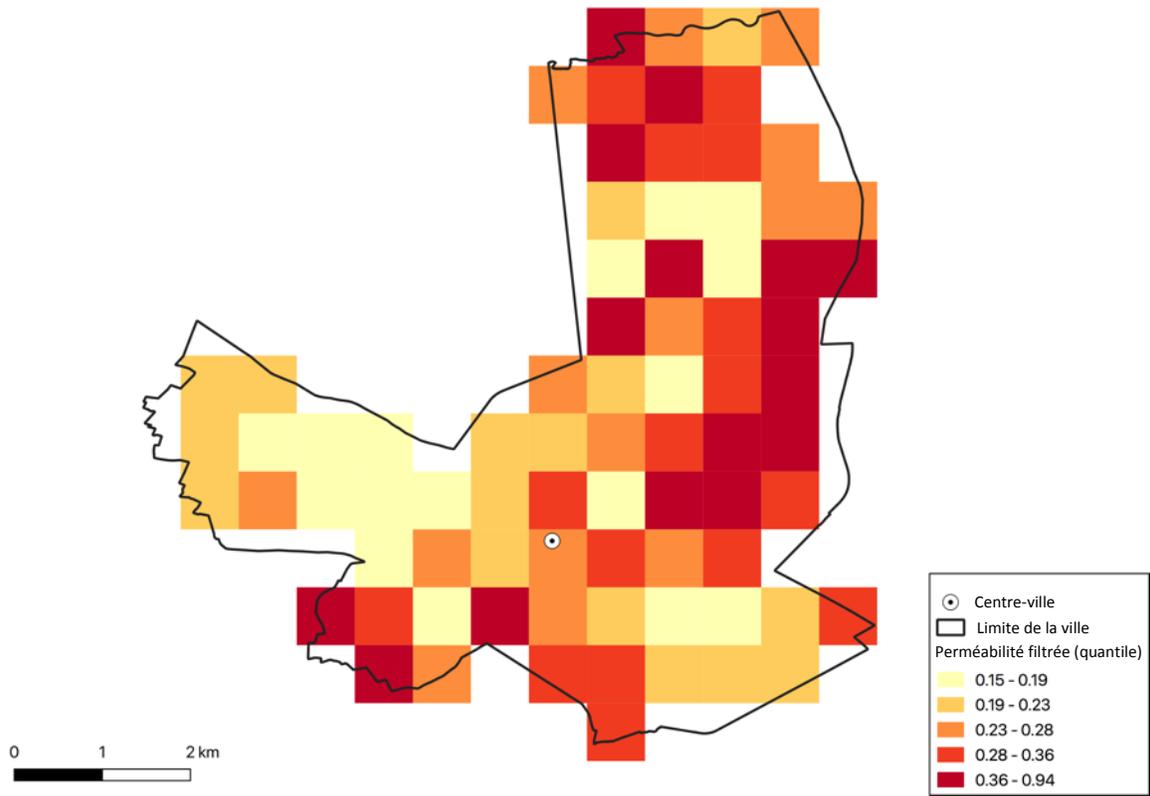


Figure 42. Perméabilité filtrée, Bordeaux (n = 79 ; moyenne = 0,28 ; rang = 21/60)

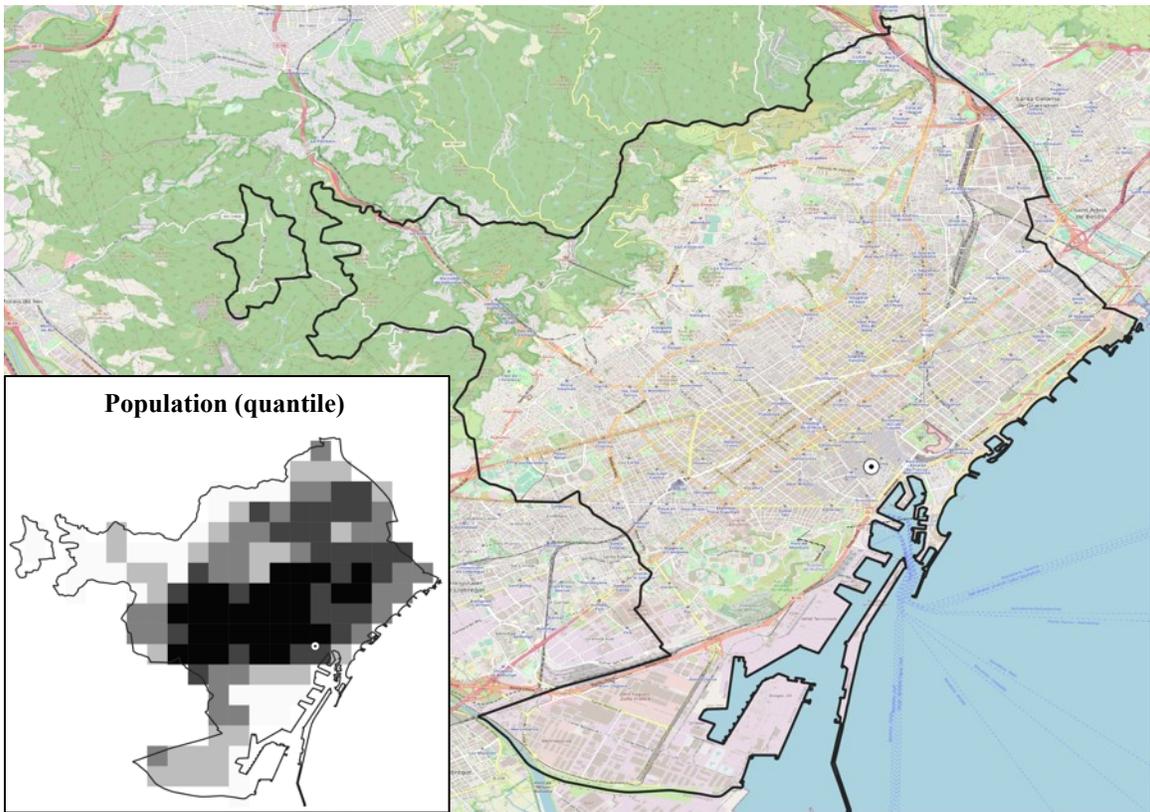
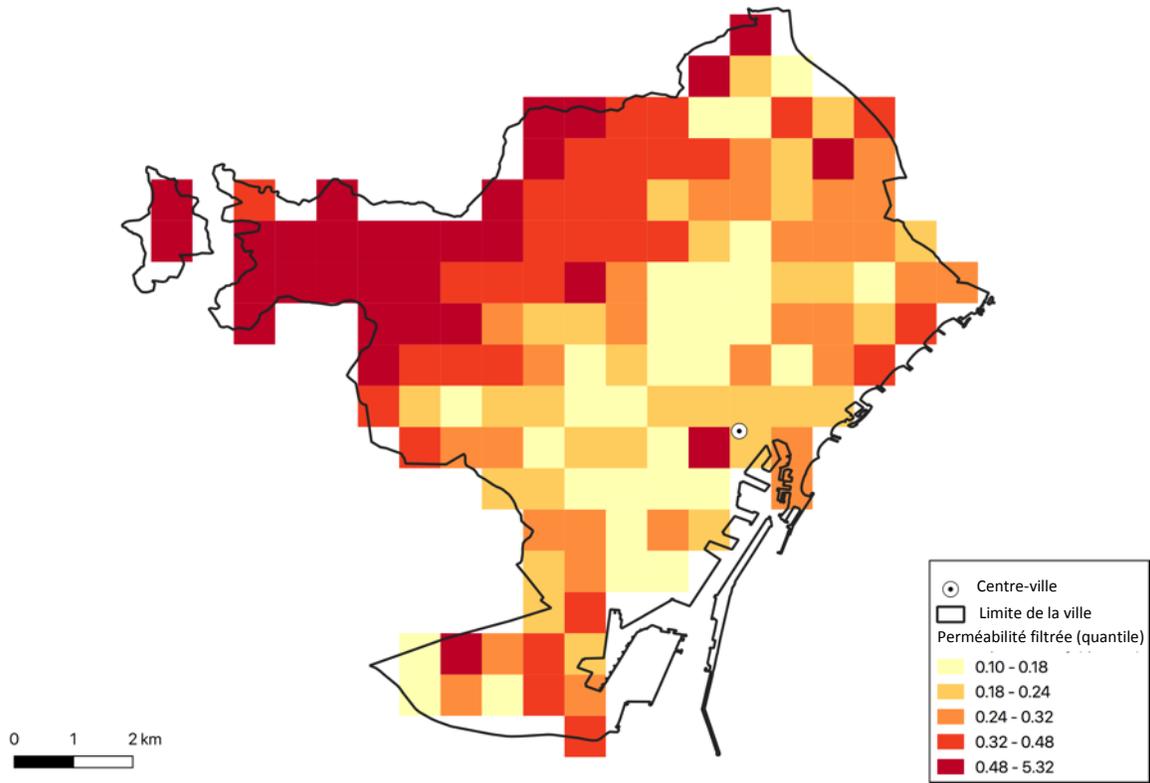


Figure 43. Perméabilité filtrée, Barcelone (n = 150 ; moyenne = 0,27 ; rang = 22/60)

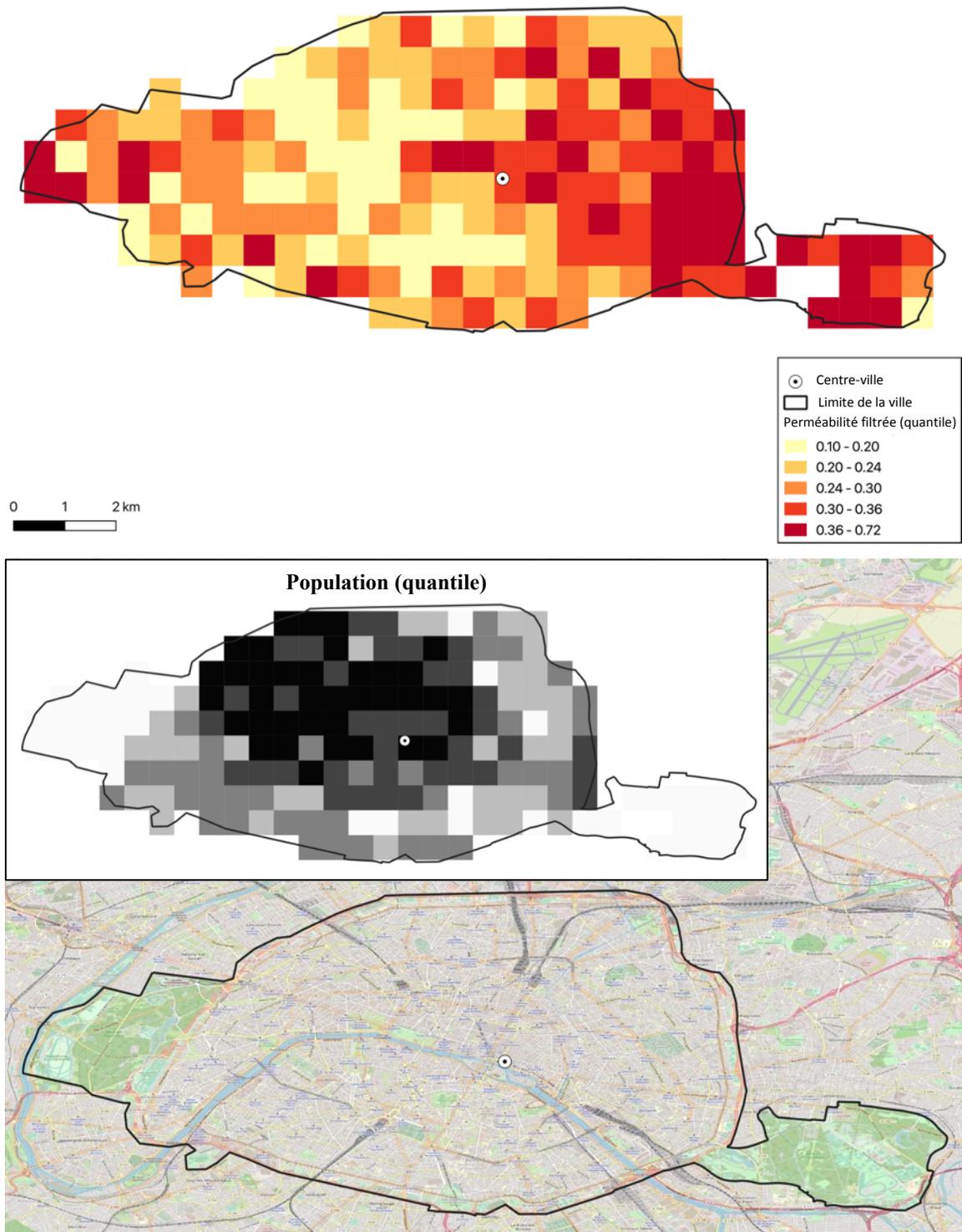


Figure 44. Perméabilité filtrée, Paris (n = 185 ; moyenne = 0,26 ; rang = 23/60)

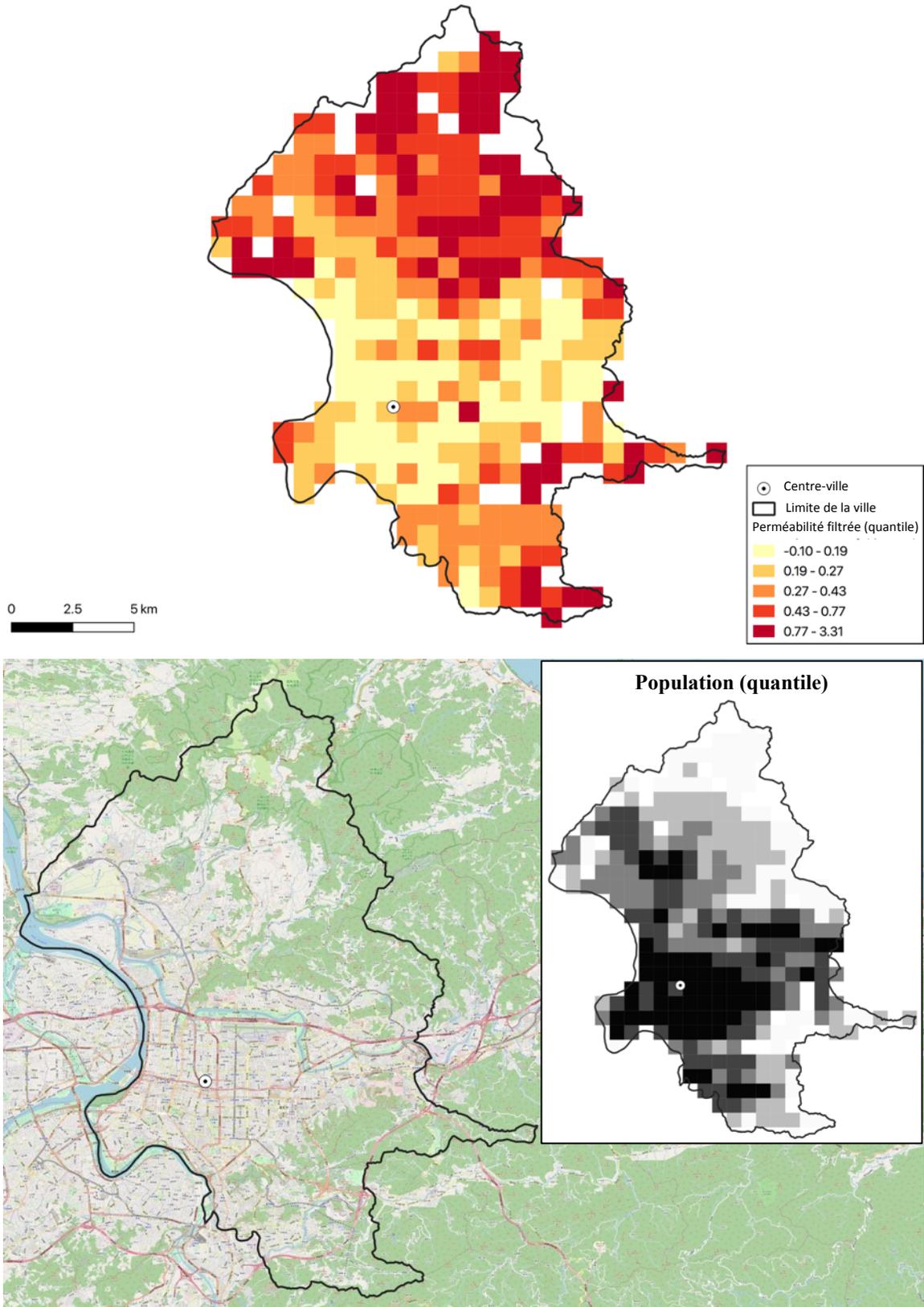


Figure 45. Perméabilité filtrée, Taipei (n = 317 ; moyenne = 0,26 ; rang = 24/60)

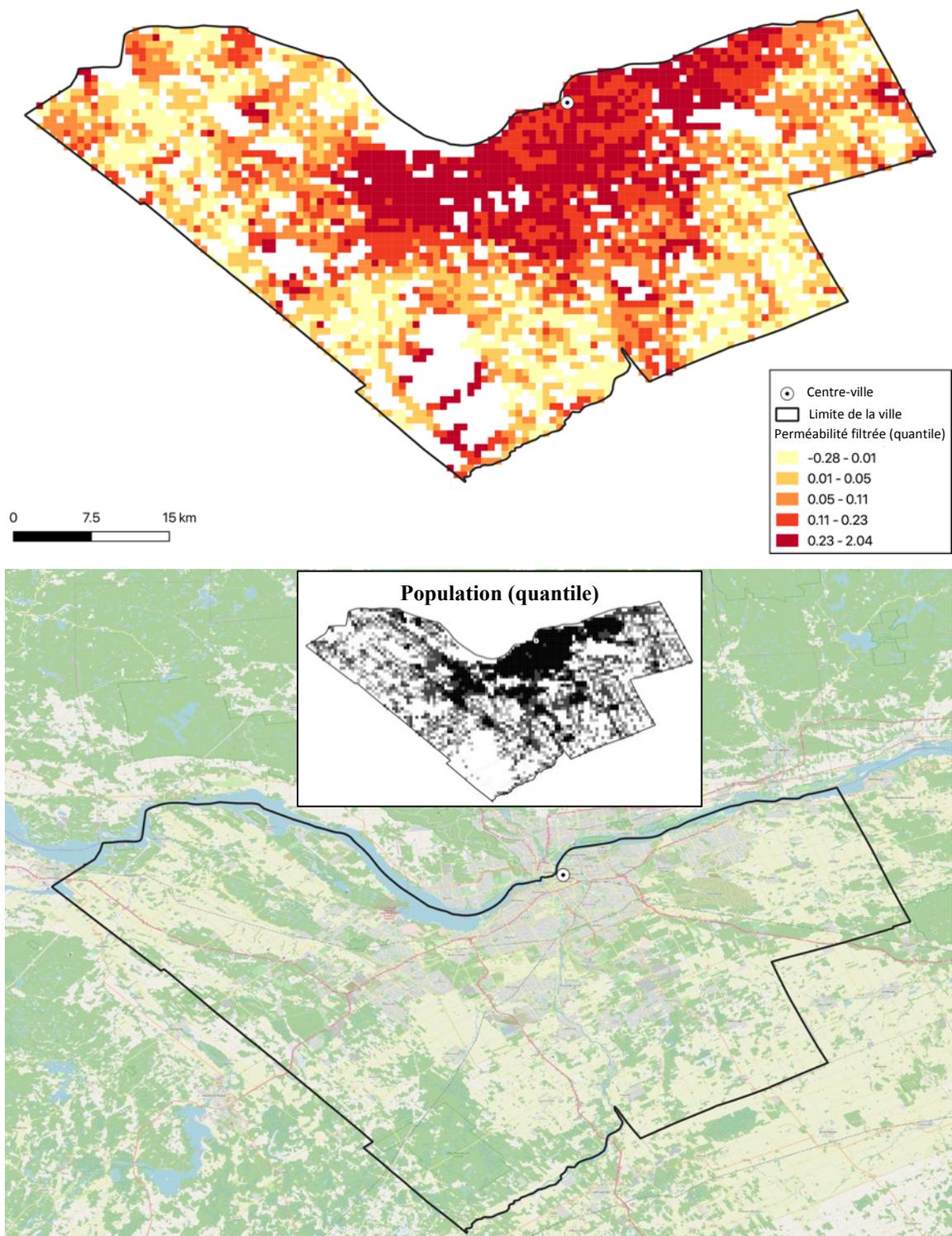


Figure 46. Perméabilité filtrée, Ottawa (n = 3607 ; moyenne = 0,25 ; rang = 25/60)

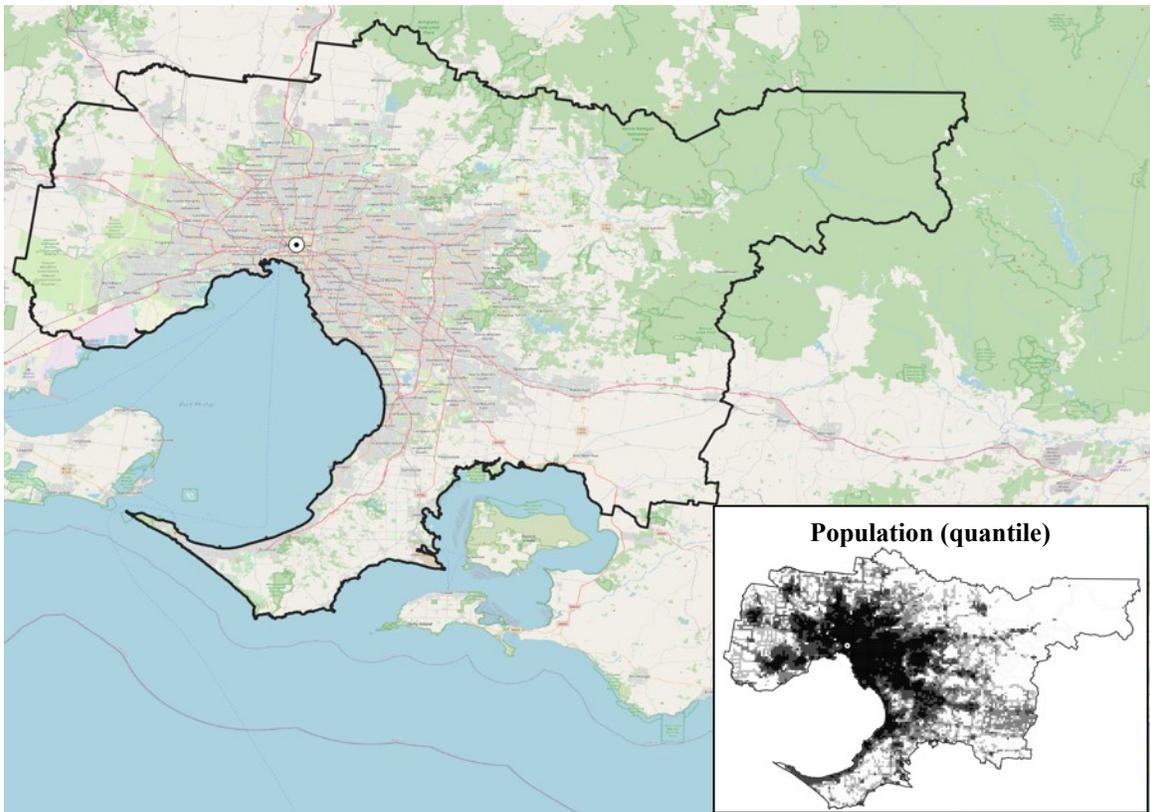
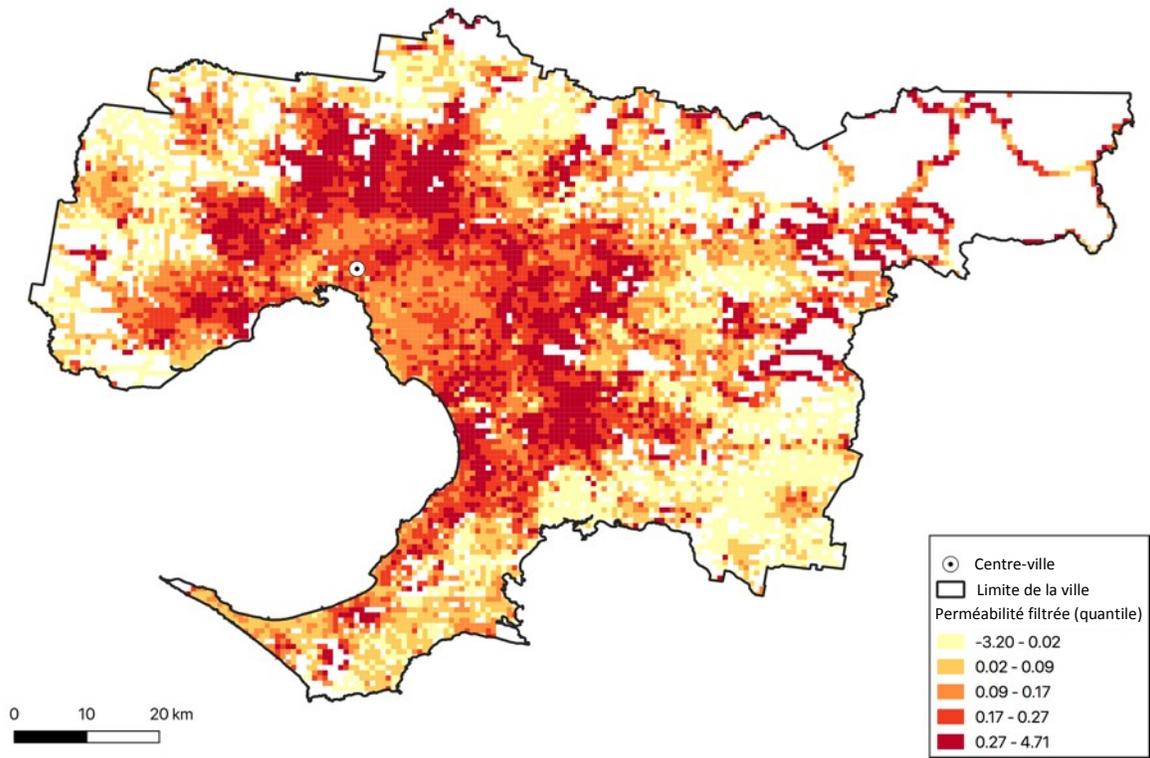


Figure 47. Perméabilité filtrée, Melbourne (n = 9229 ; moyenne = 0,23 ; rang = 26/60)

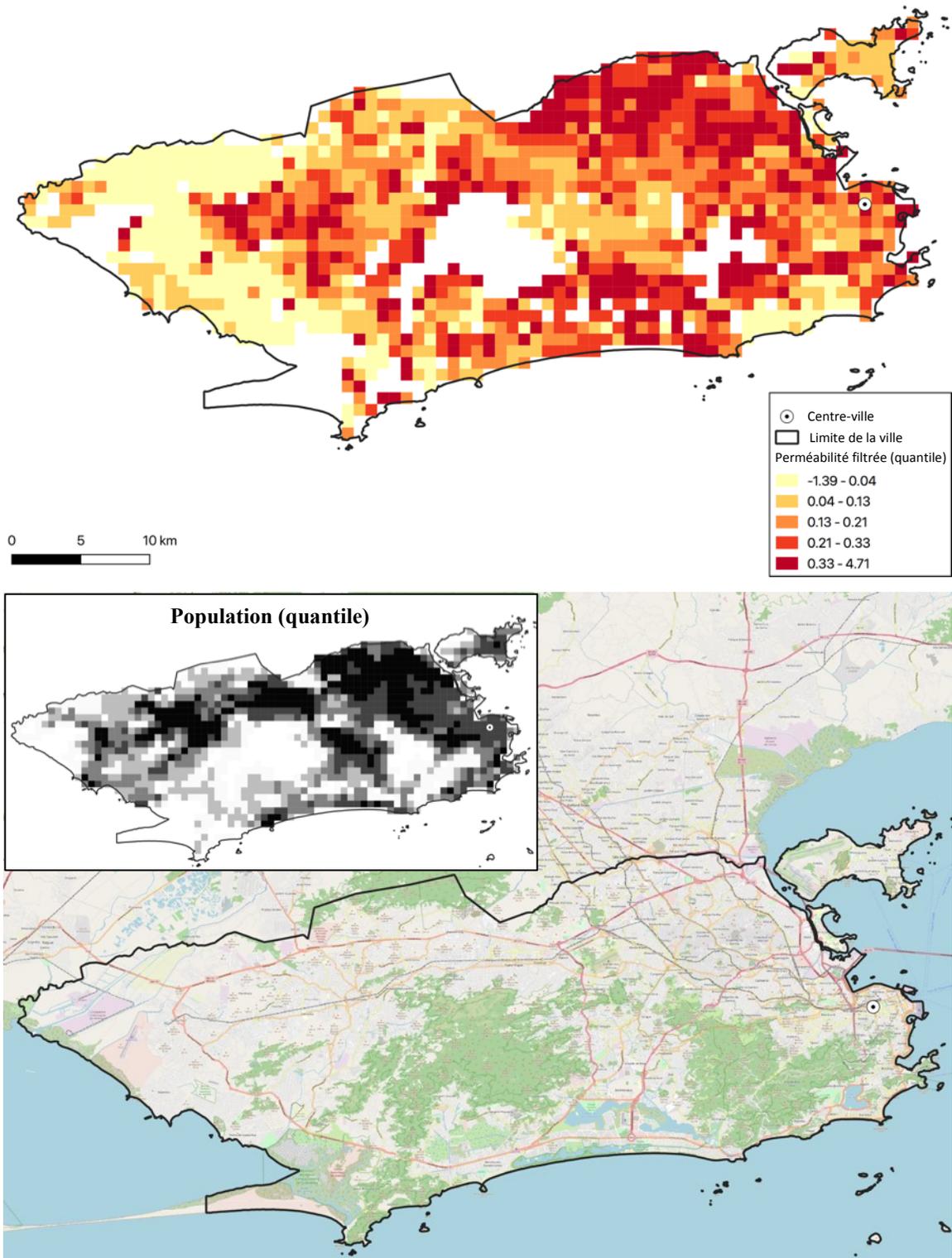


Figure 48. Perméabilité filtrée, Rio de Janeiro (n = 1264 ; moyenne = 0,21 ; rang = 27/60)

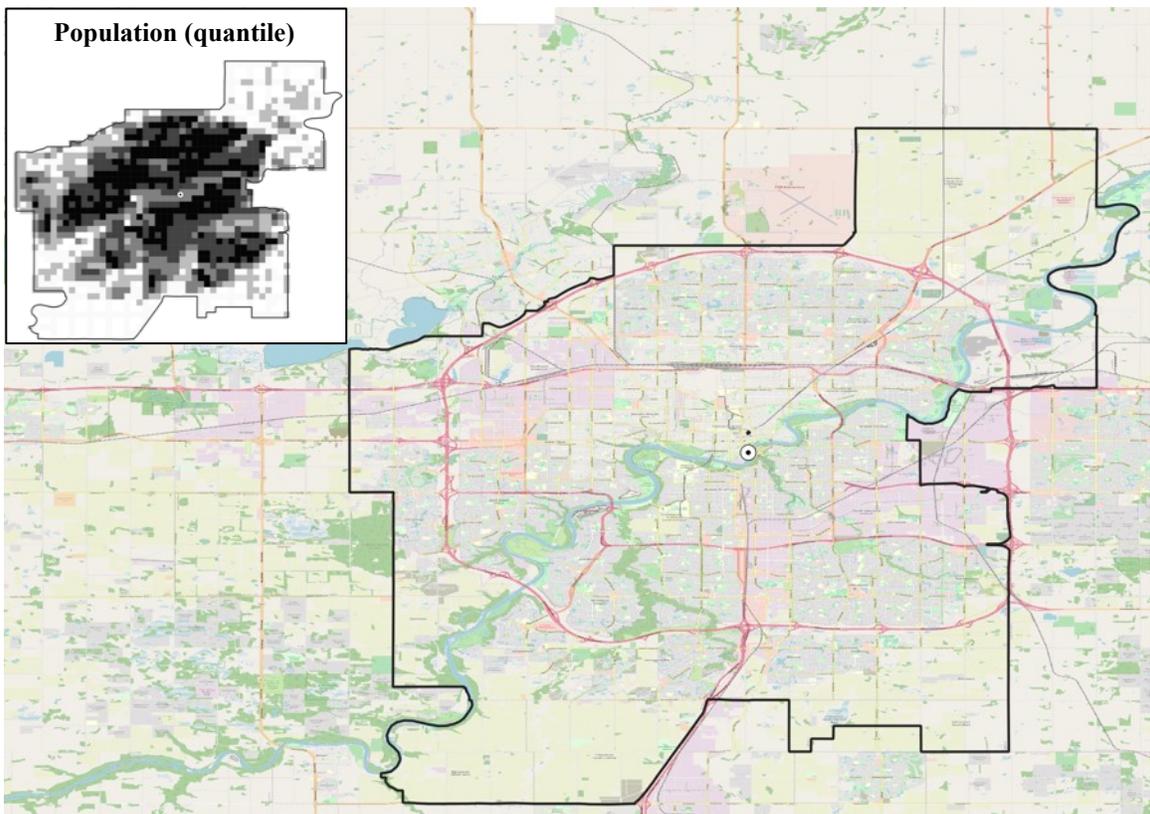
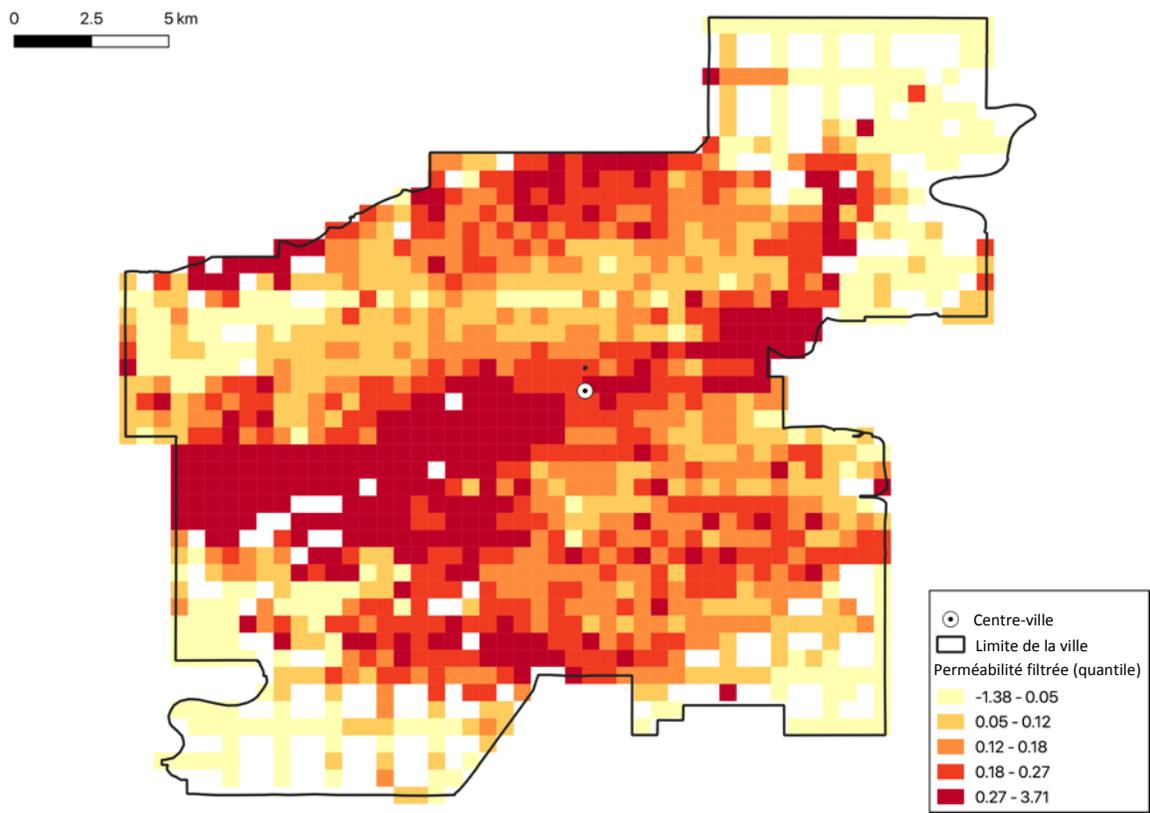


Figure 49. Perméabilité filtrée, Edmonton (n = 1339 ; moyenne = 0,21 ; rang = 28/60)

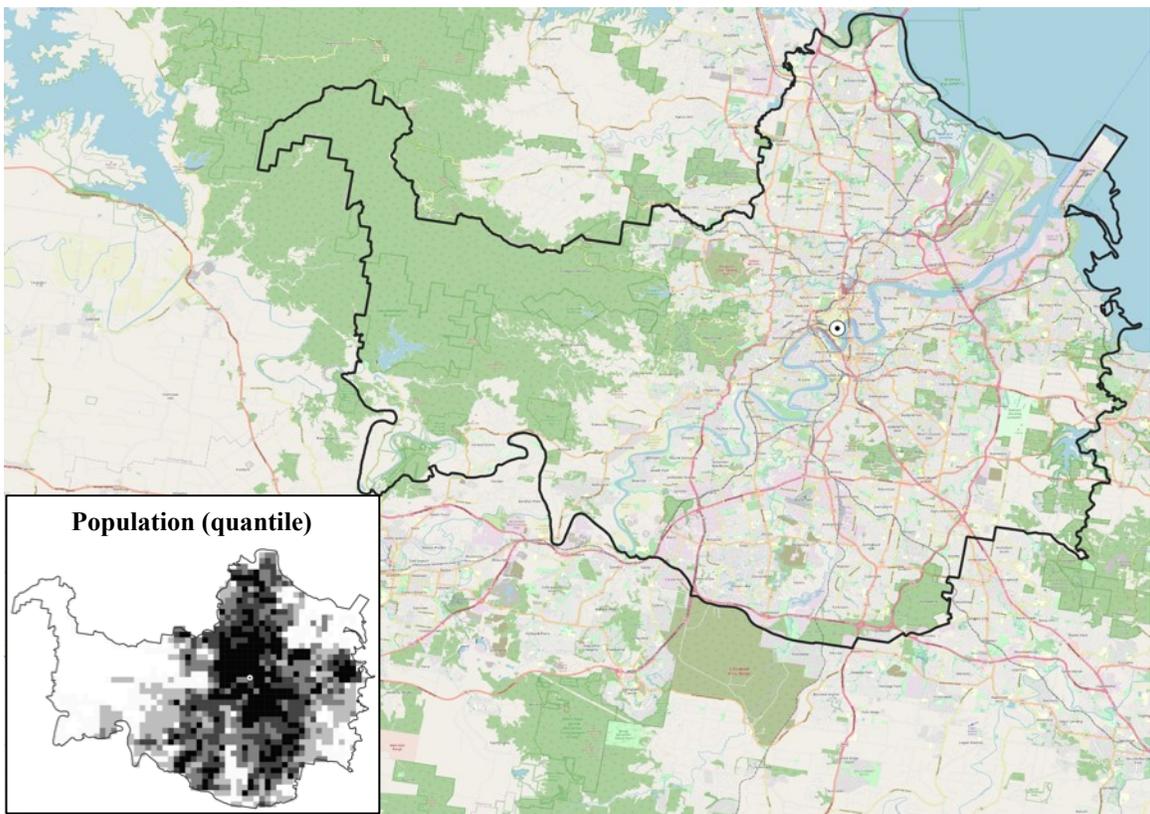
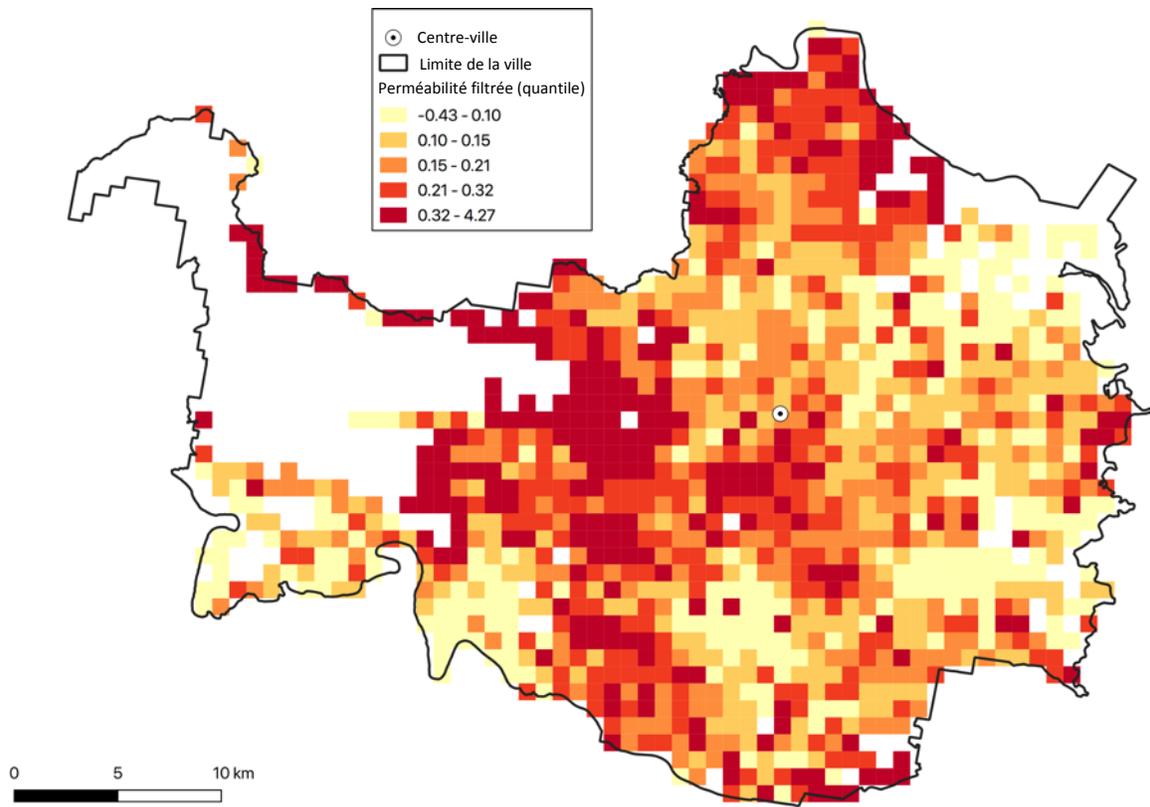


Figure 50. Perméabilité filtrée, Brisbane (n = 1235 ; moyenne = 0,20 ; rang = 29/60)

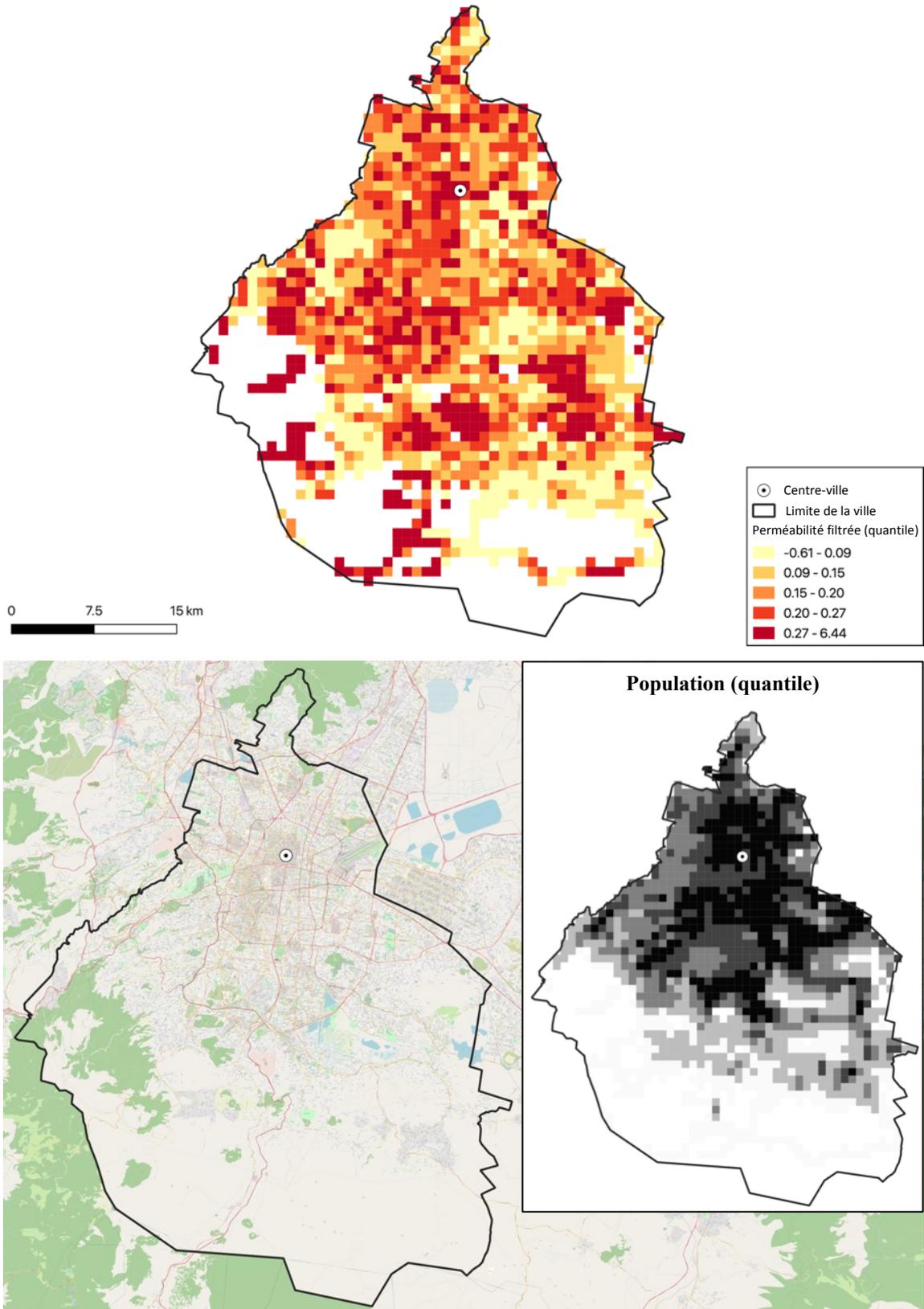


Figure 51. Perméabilité filtrée, Mexico (n = 1386 ; moyenne = 0,19 ; rang = 30/60)

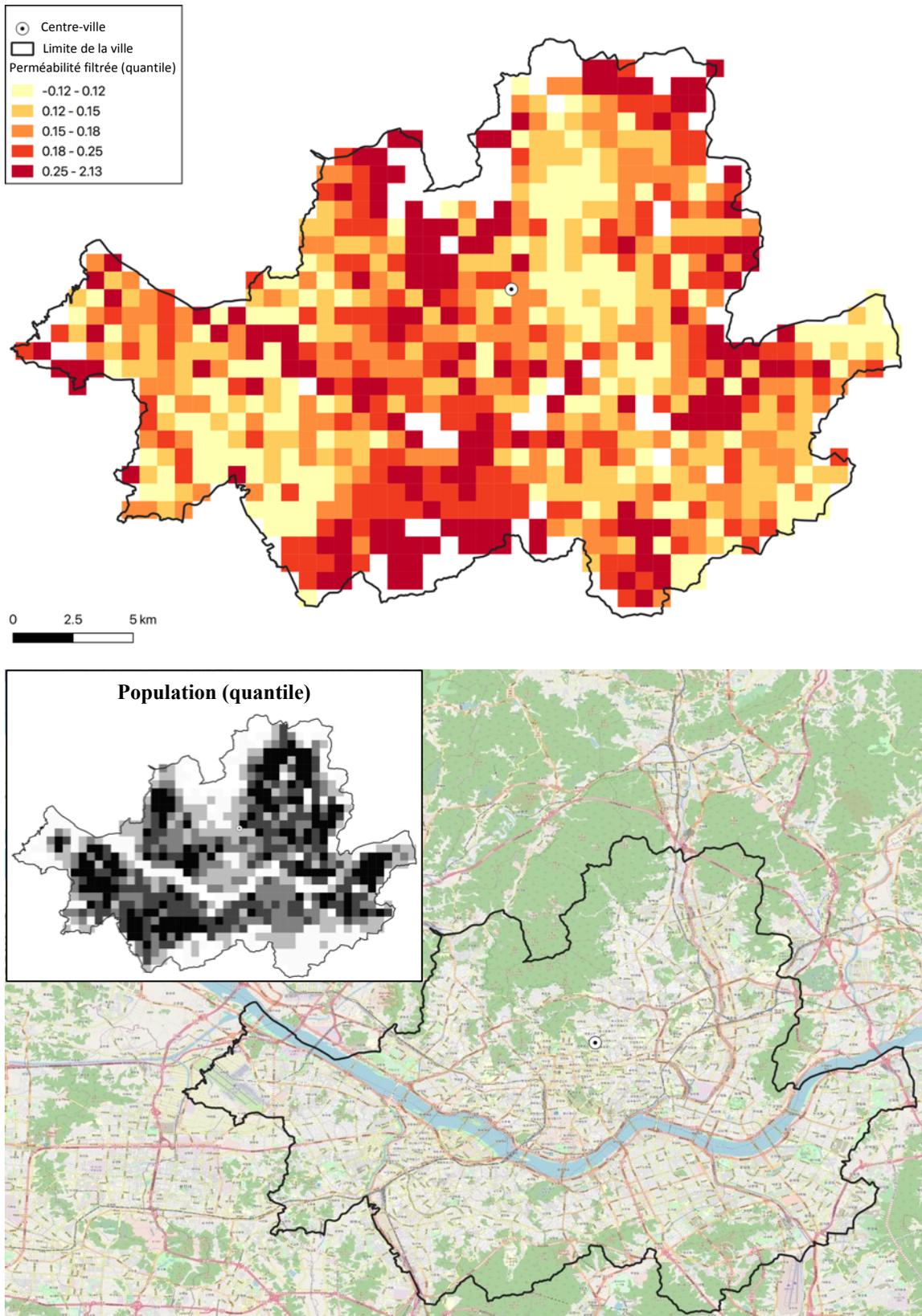


Figure 52. Perméabilité filtrée, Séoul (n = 810 ; moyenne = 0,17 ; rang = 31/60)

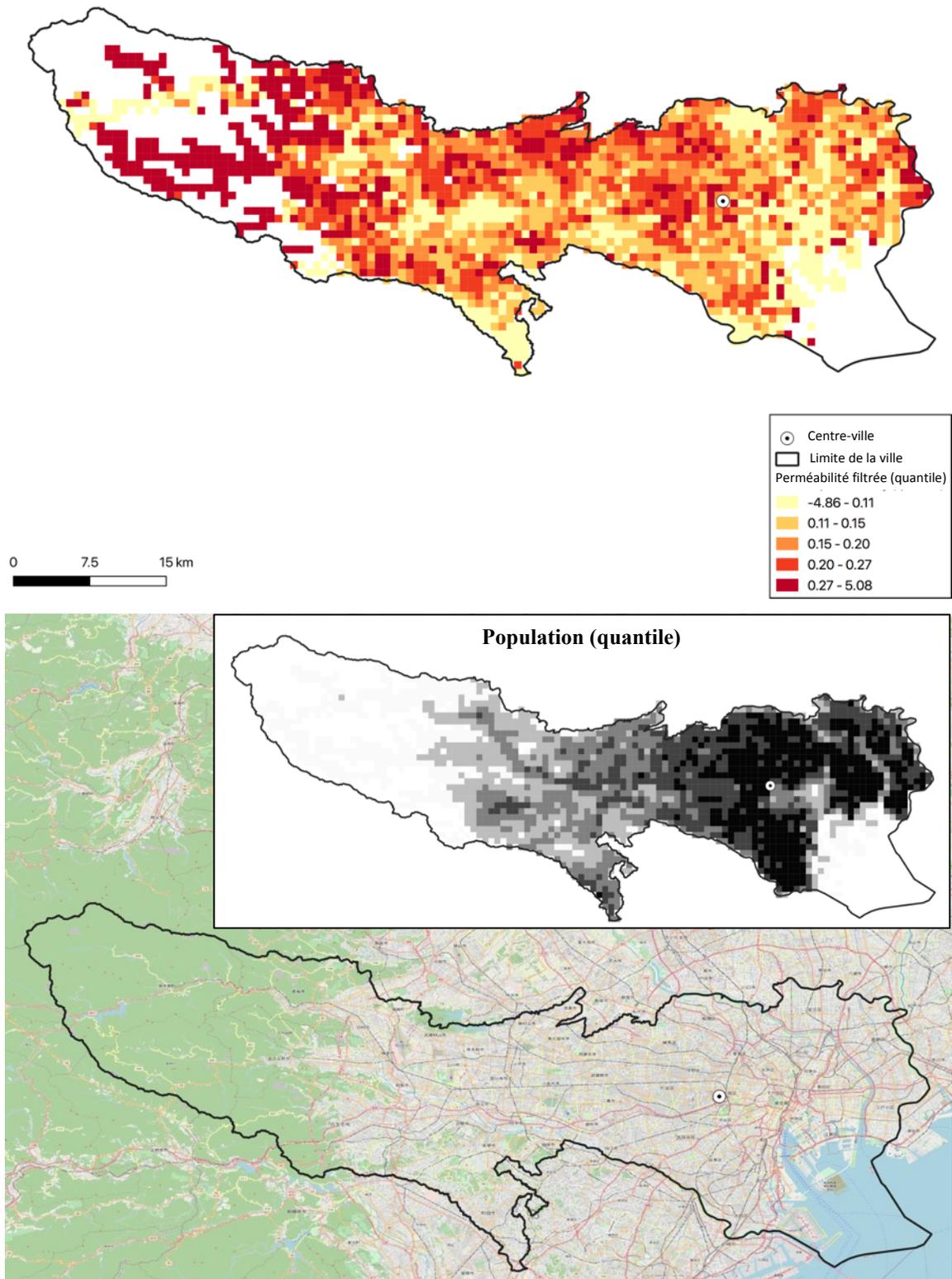


Figure 53. Perméabilité filtrée, Tokyo (n = 2126 ; moyenne = 0,17 ; rang = 32/60)

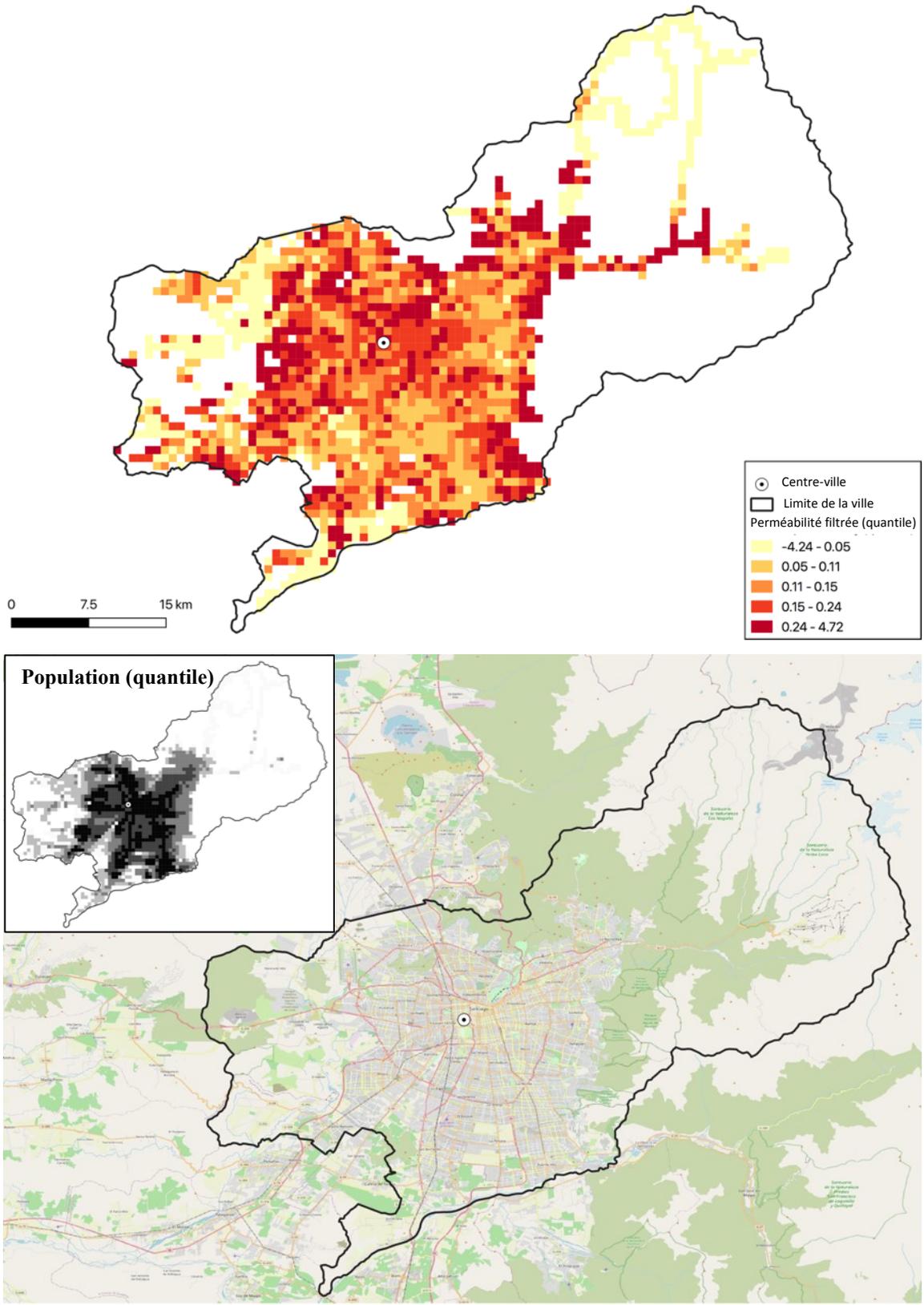


Figure 54. Perméabilité filtrée, Santiago (n = 1693 ; moyenne = 0,16 ; rang = 33/60)

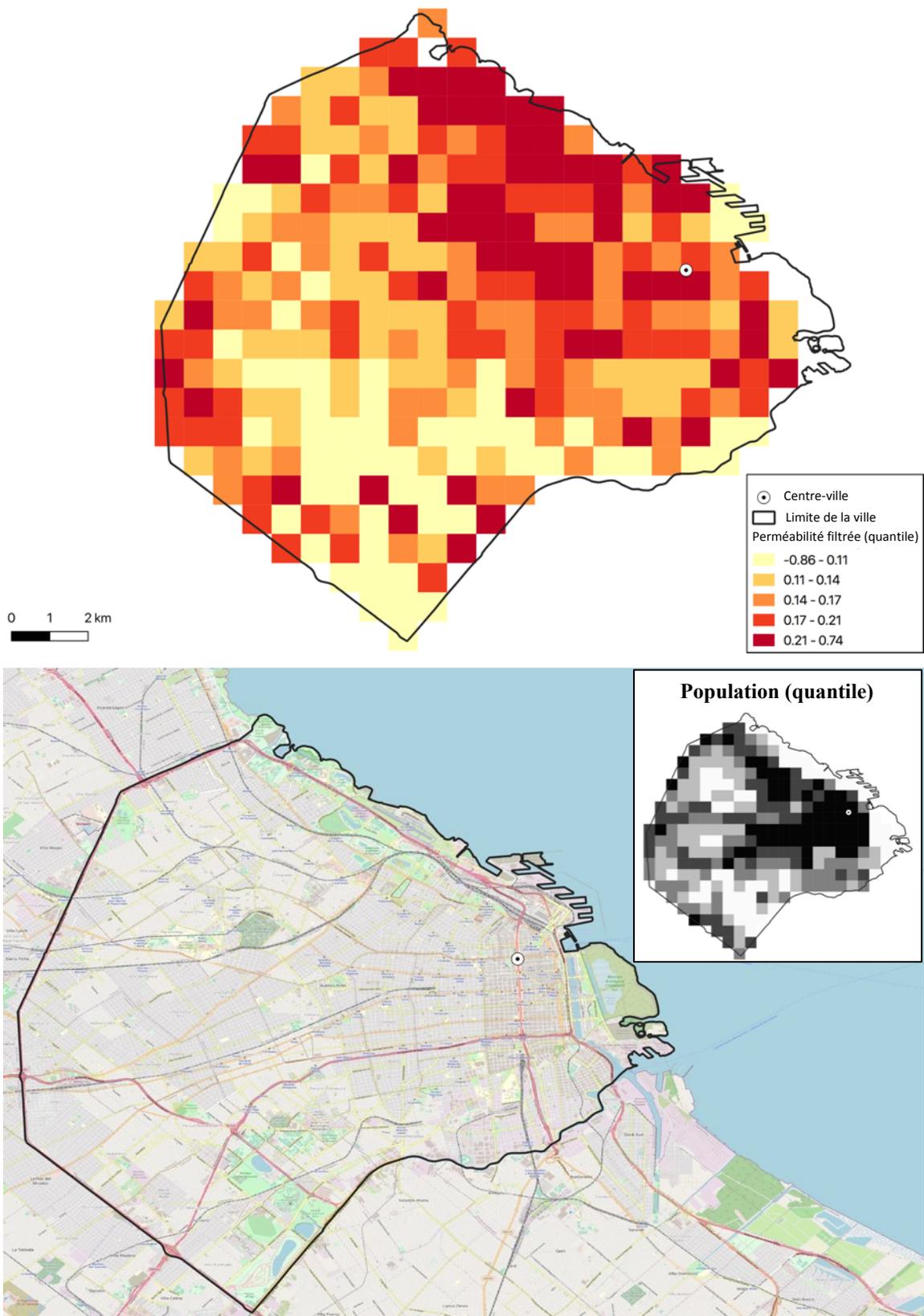


Figure 55. Perméabilité filtrée, Buenos Aires (n = 286 ; moyenne = 0,16 ; rang = 34/60)

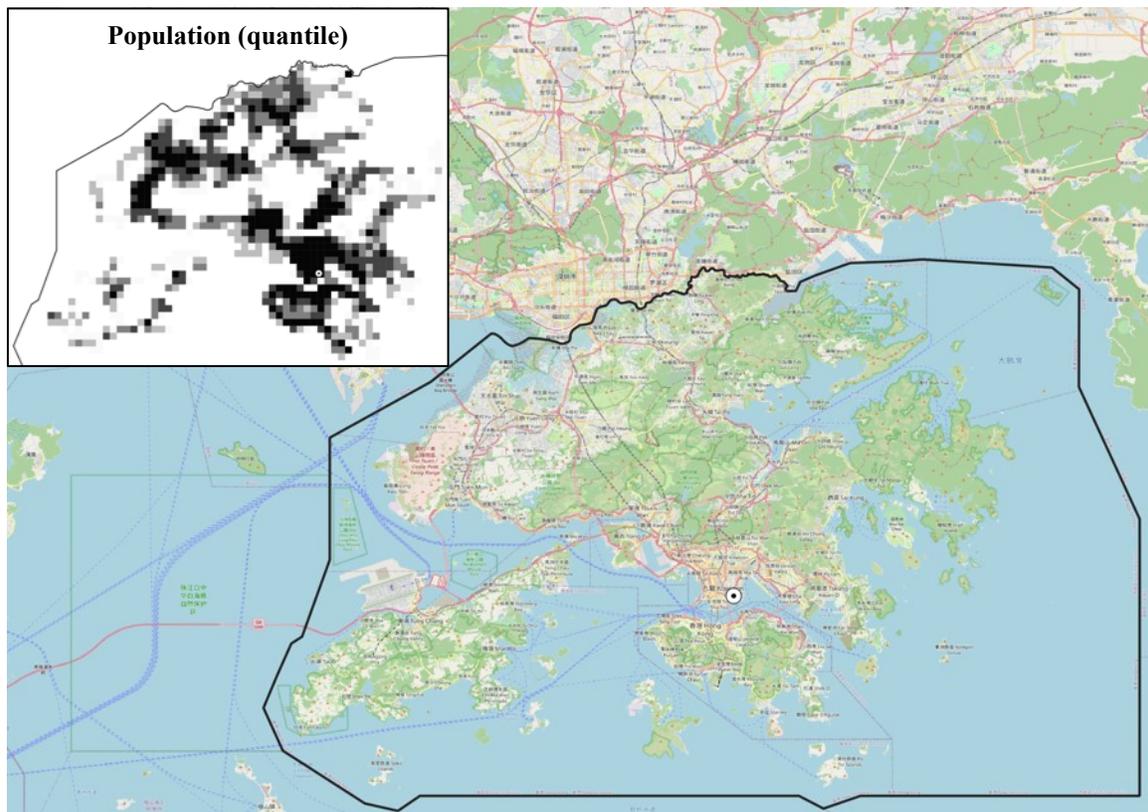
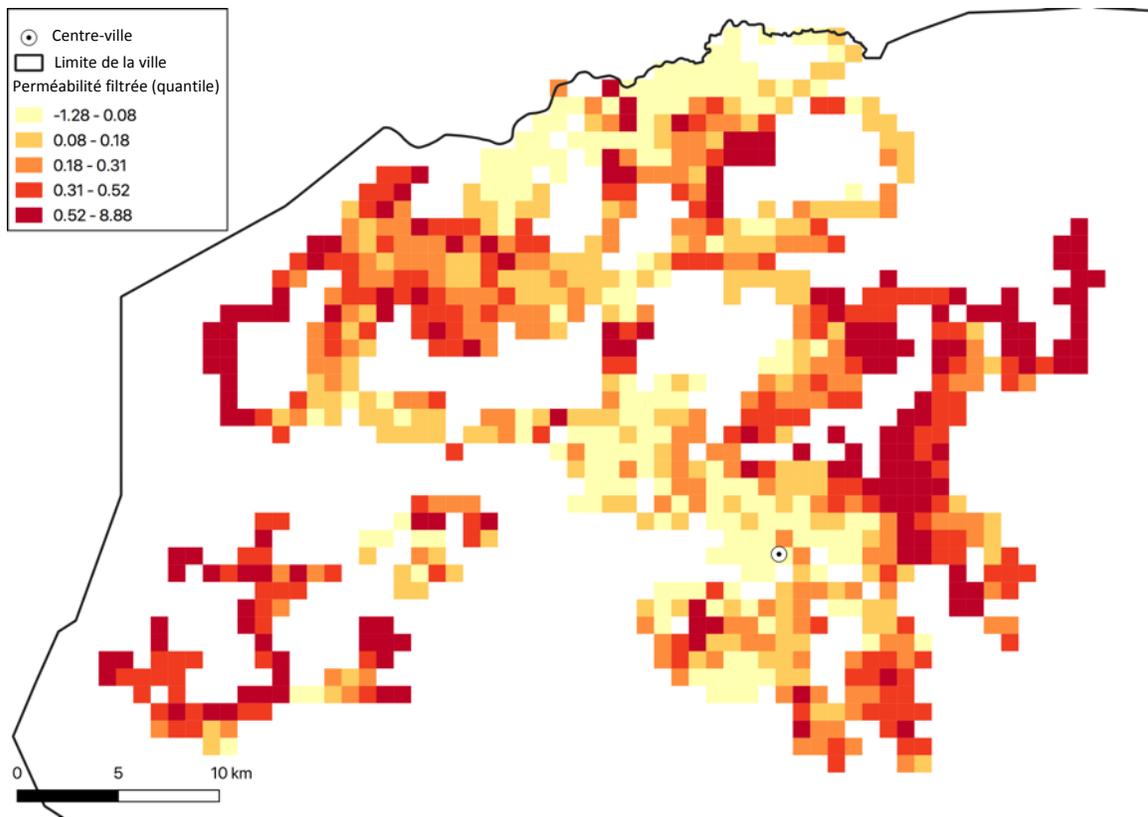


Figure 56. Perméabilité filtrée, Hong Kong (n = 866 ; moyenne = 0,16 ; rang = 35/60)

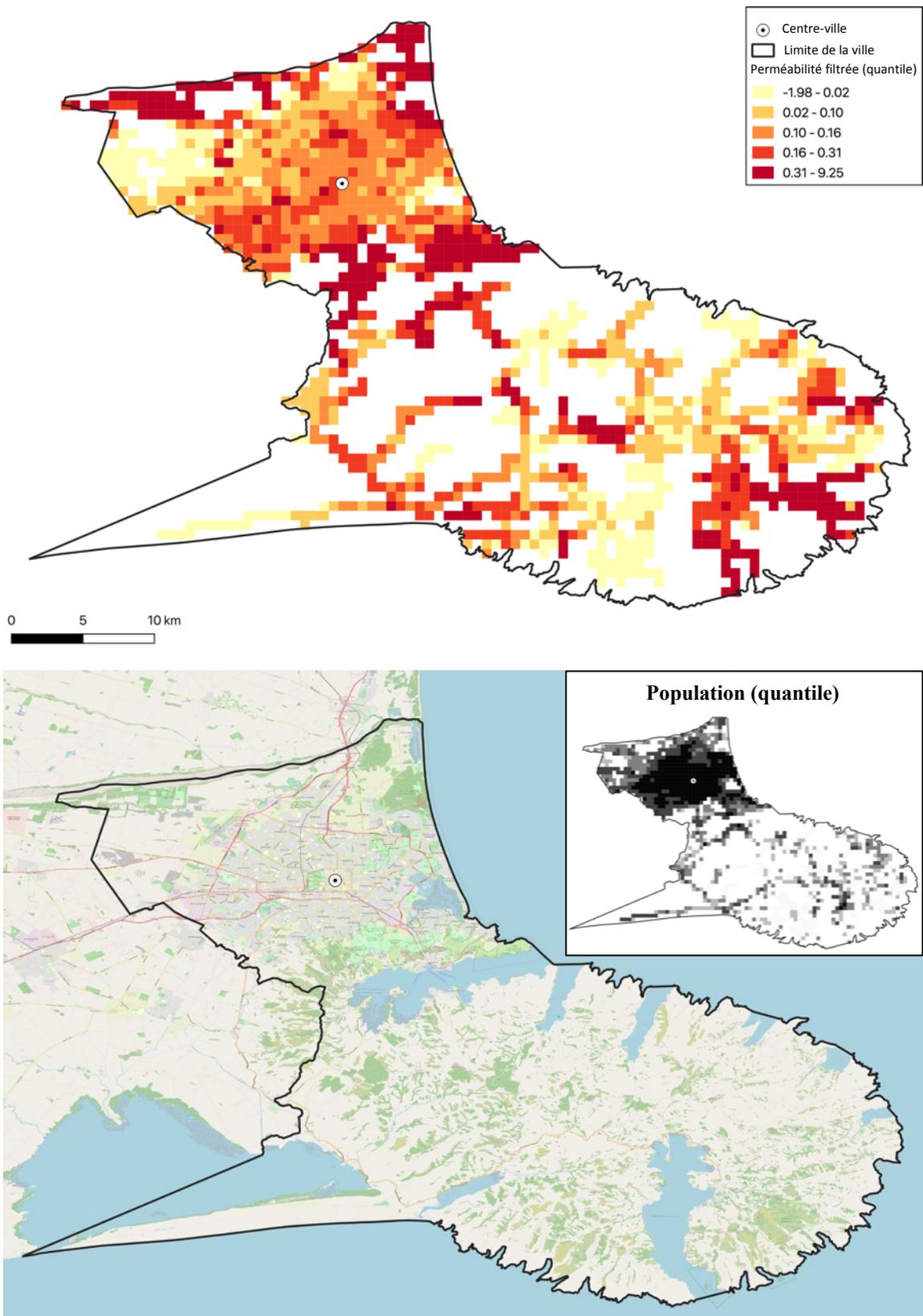


Figure 57. Perméabilité filtrée, Christchurch (n = 1385 ; moyenne = 0,15 ; rang = 36/60)

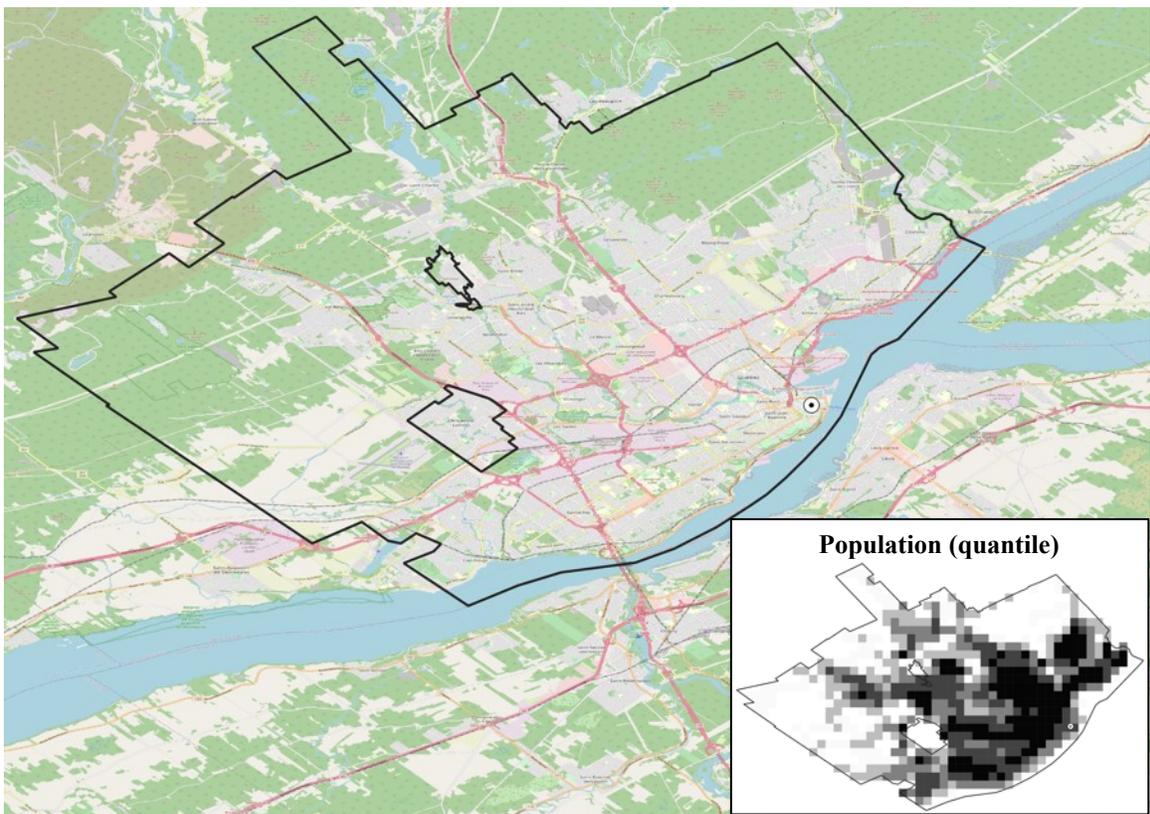
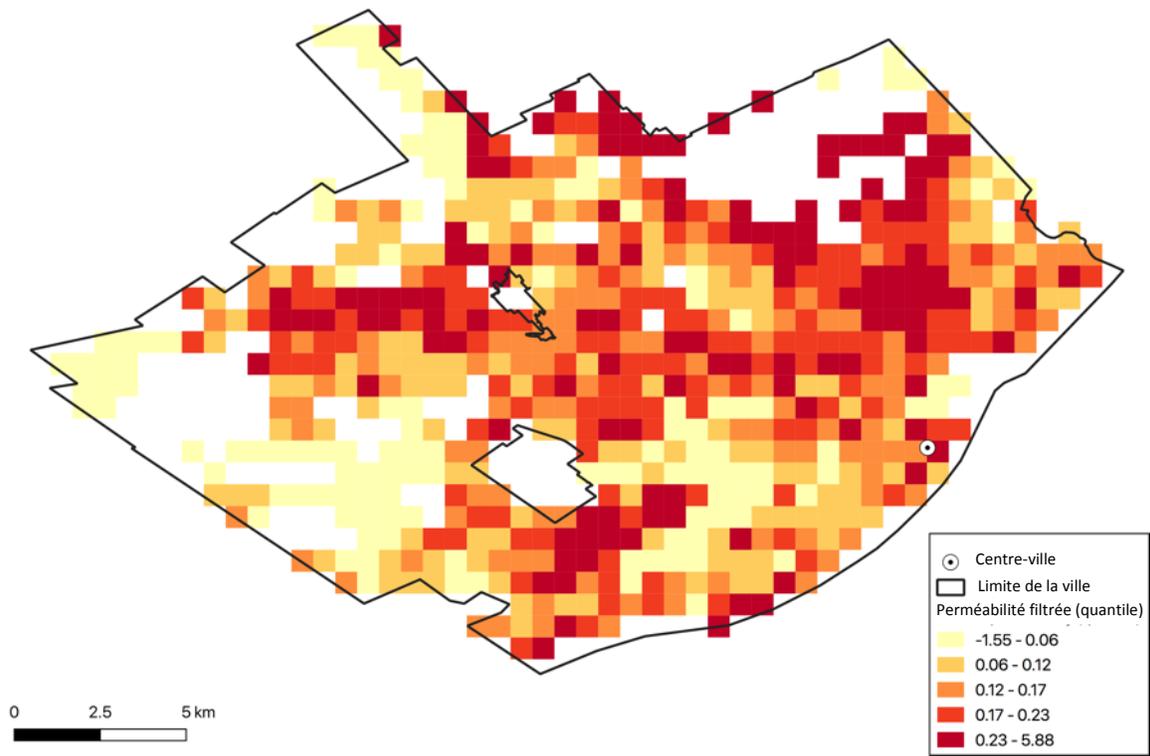


Figure 58. Perméabilité filtrée, Québec (n = 648 ; moyenne = 0,15 ; rang = 37/60)

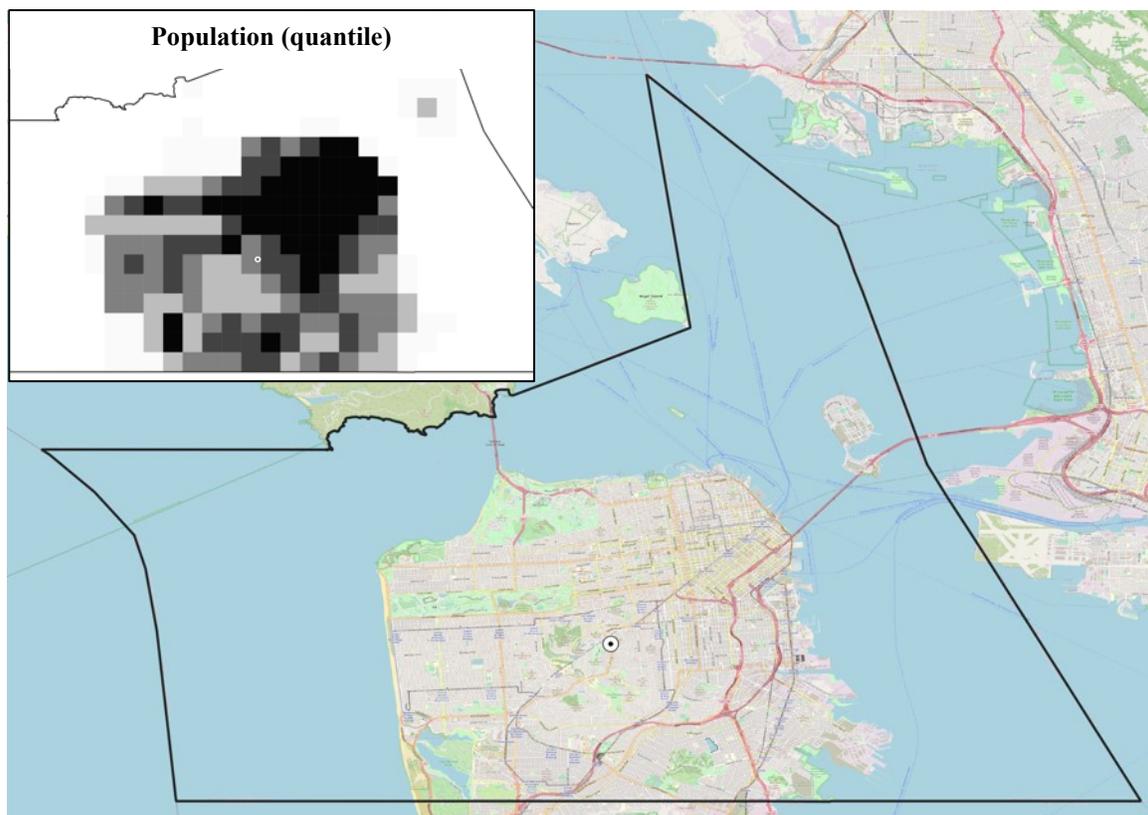
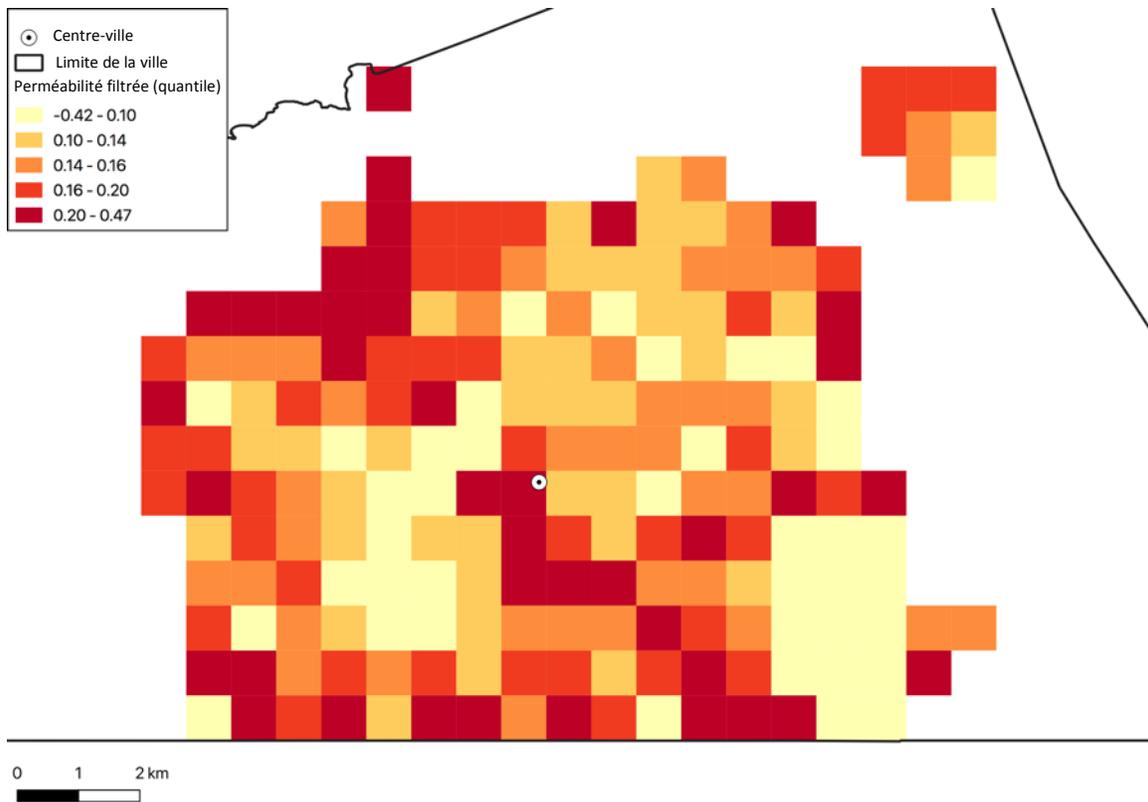


Figure 59. Perméabilité filtrée, San Francisco (n = 198 ; moyenne = 0,14 ; rang = 38/60)

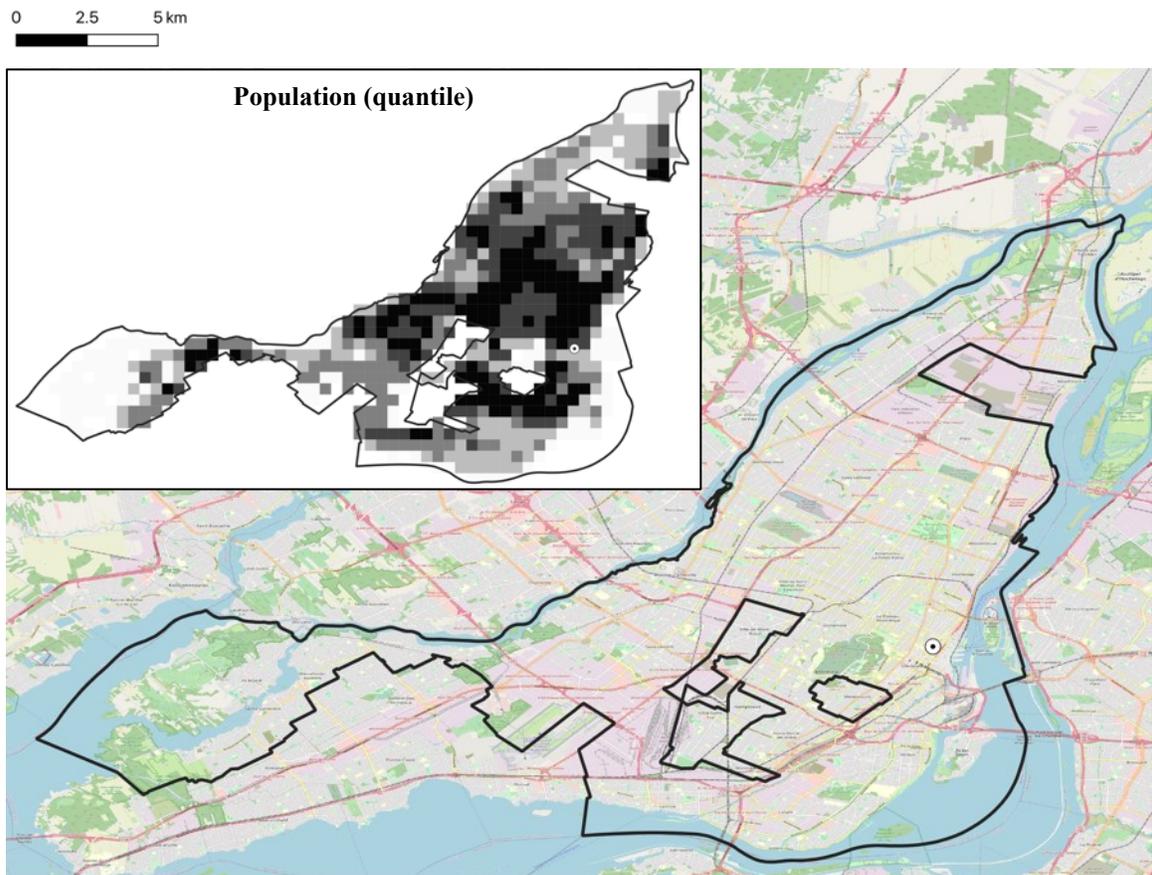
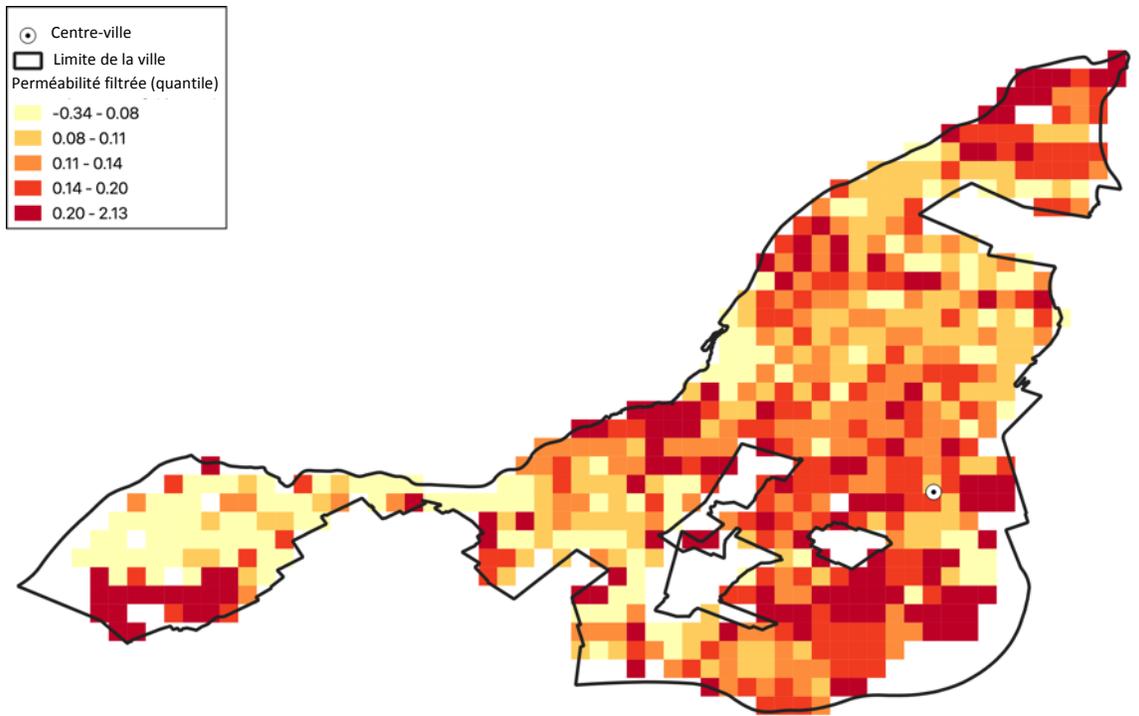


Figure 60. Perméabilité filtrée, Montréal (n = 876 ; moyenne = 0,14 ; rang = 39/60)

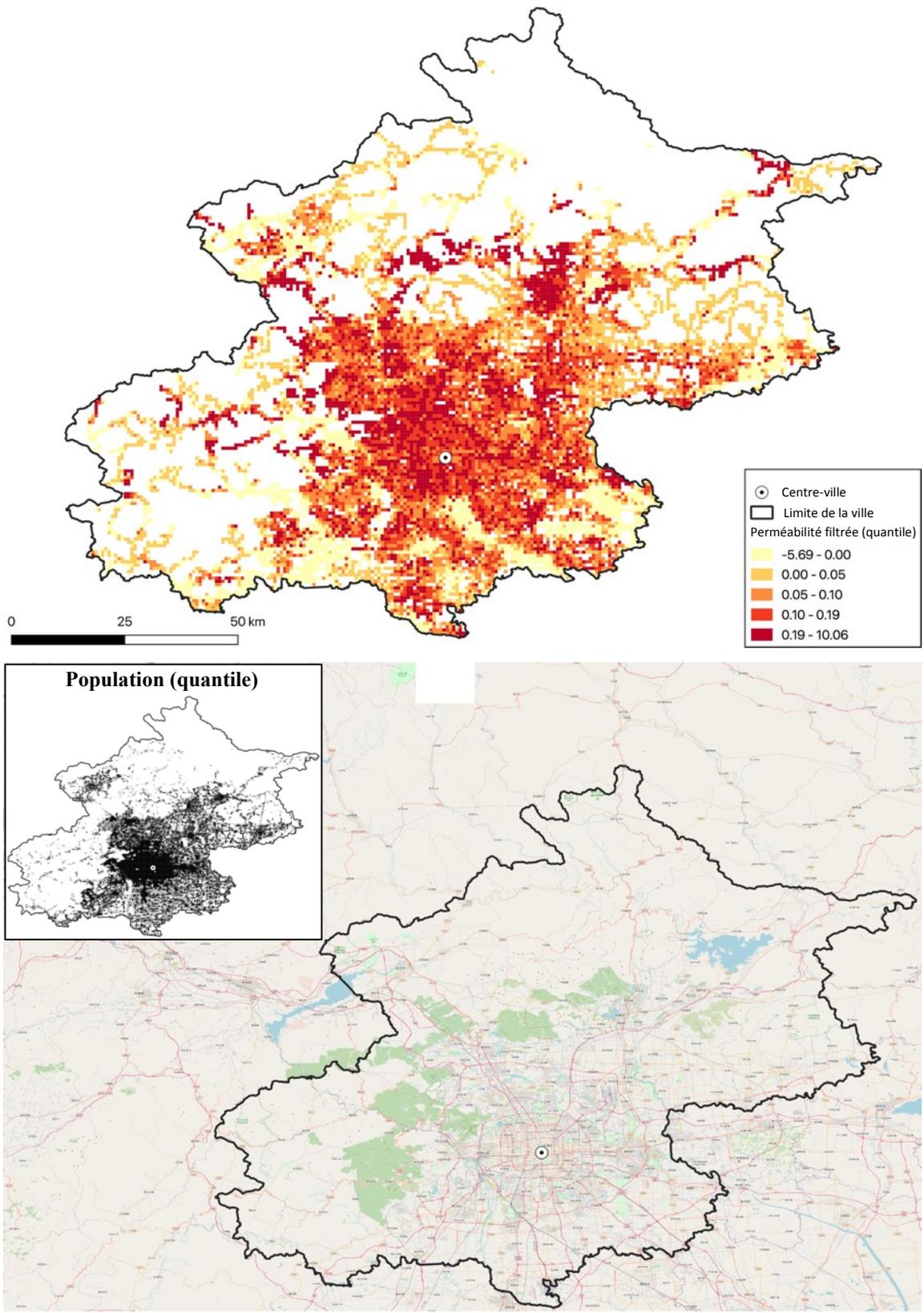


Figure 61. Perméabilité filtrée, Pékin (n = 12 529 ; moyenne = 0,14 ; rang = 40/60)

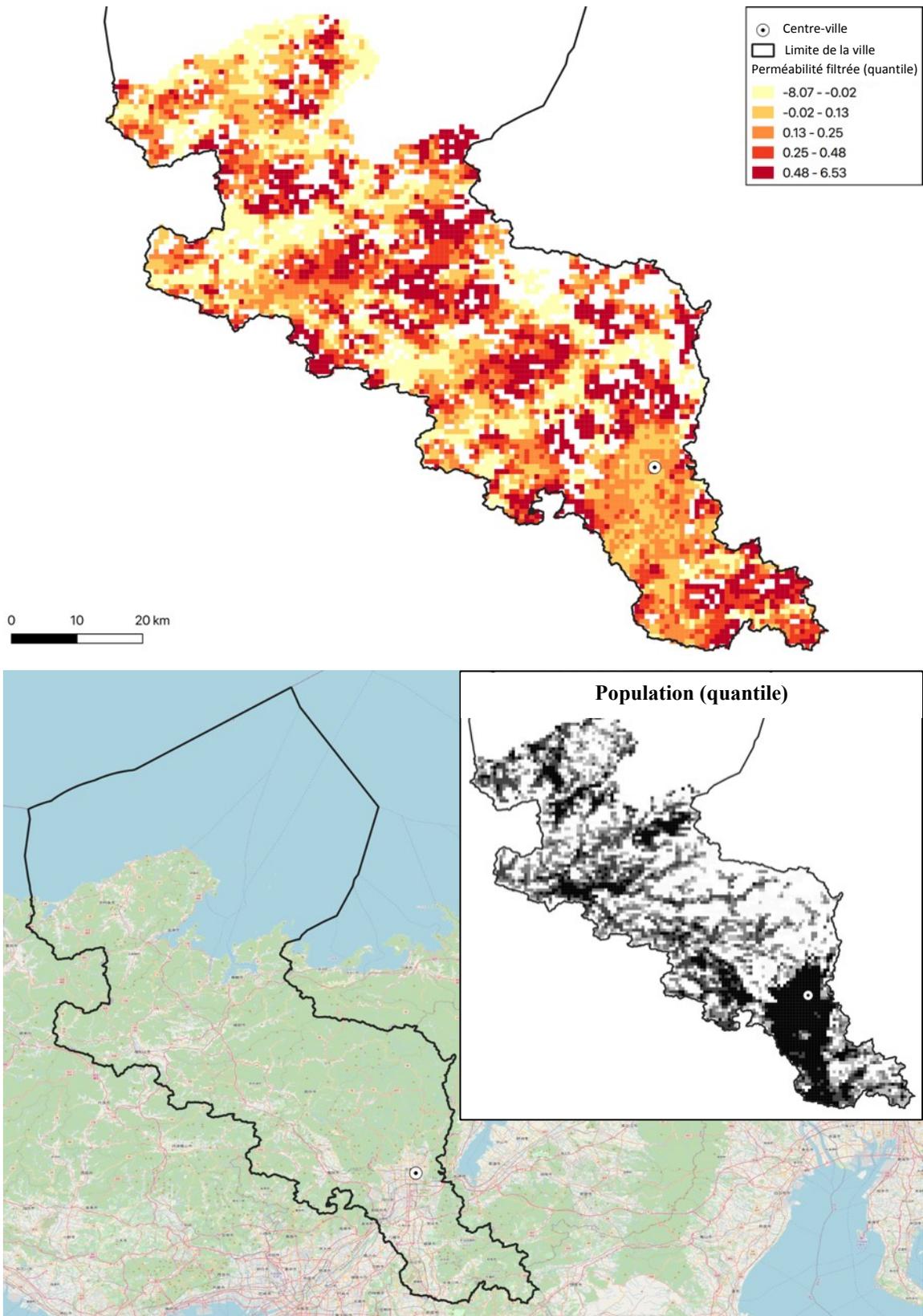


Figure 62. Perméabilité filtrée, Kyoto (n = 5337, moyenne = 0.14, rang = 41/60)

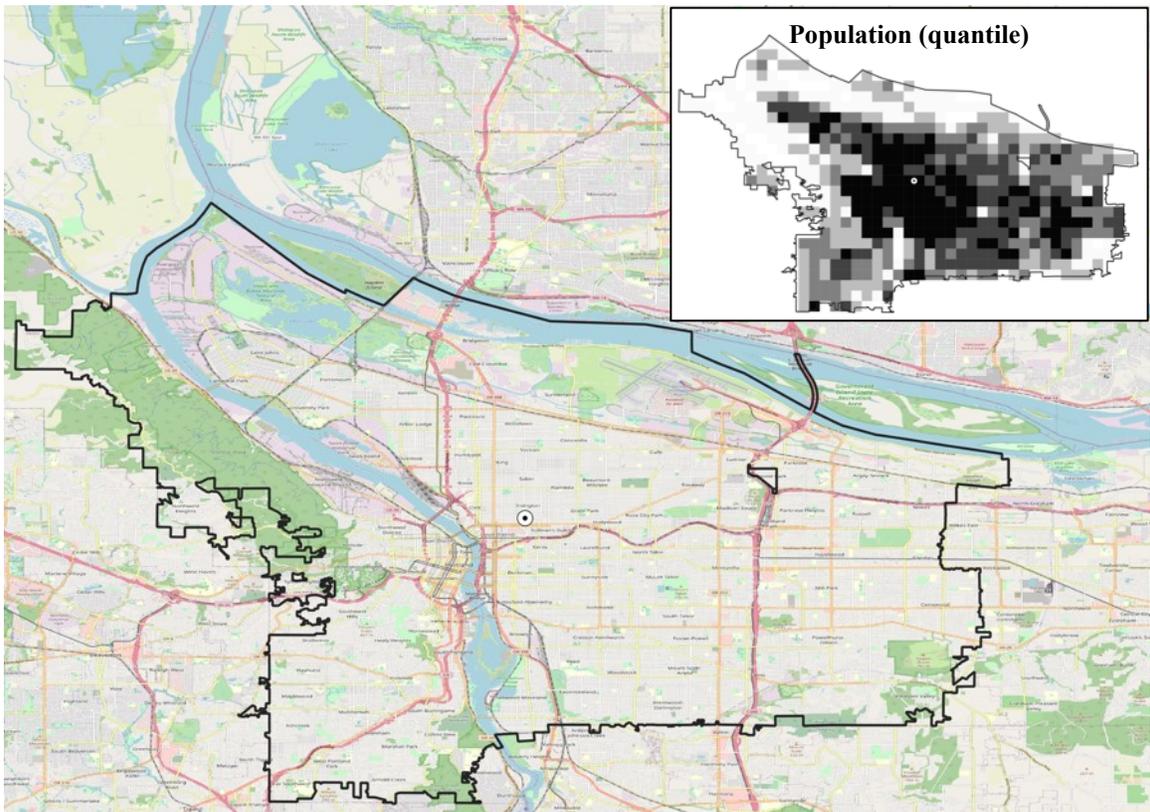
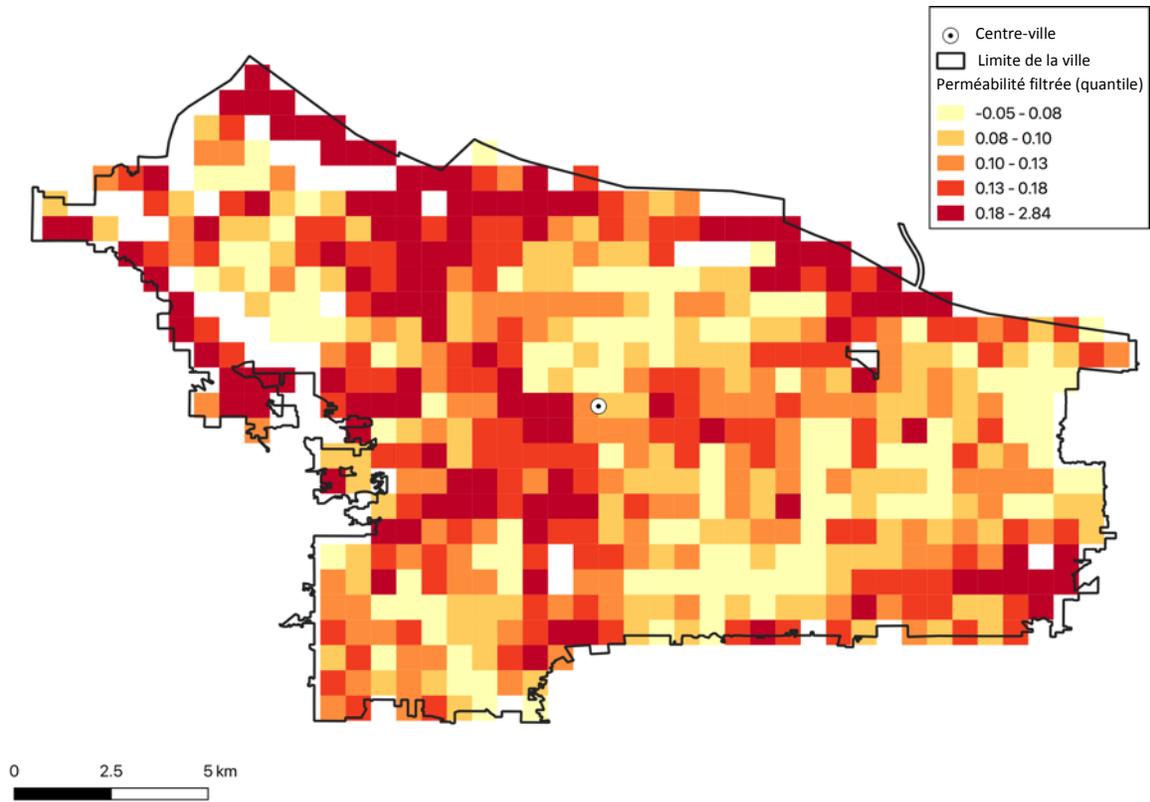


Figure 63. Perméabilité filtrée, Portland (n = 579 ; moyenne = 0,14 ; rang = 42/60)

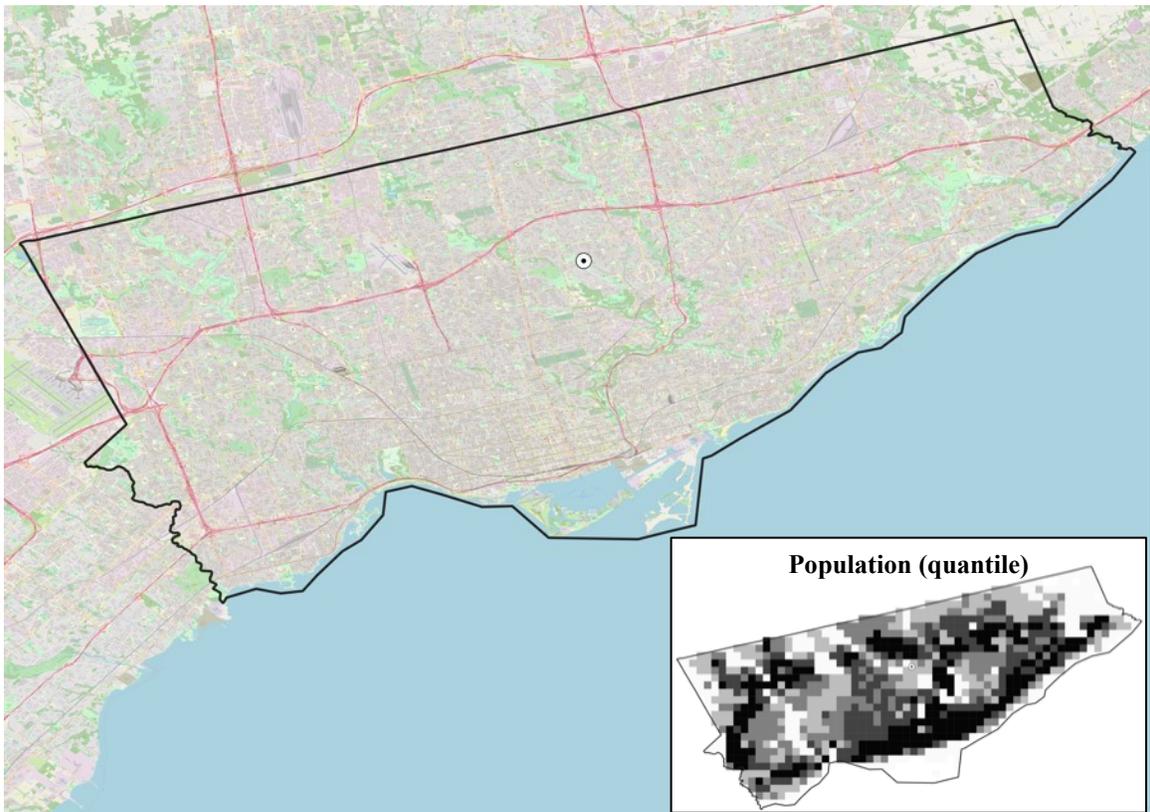
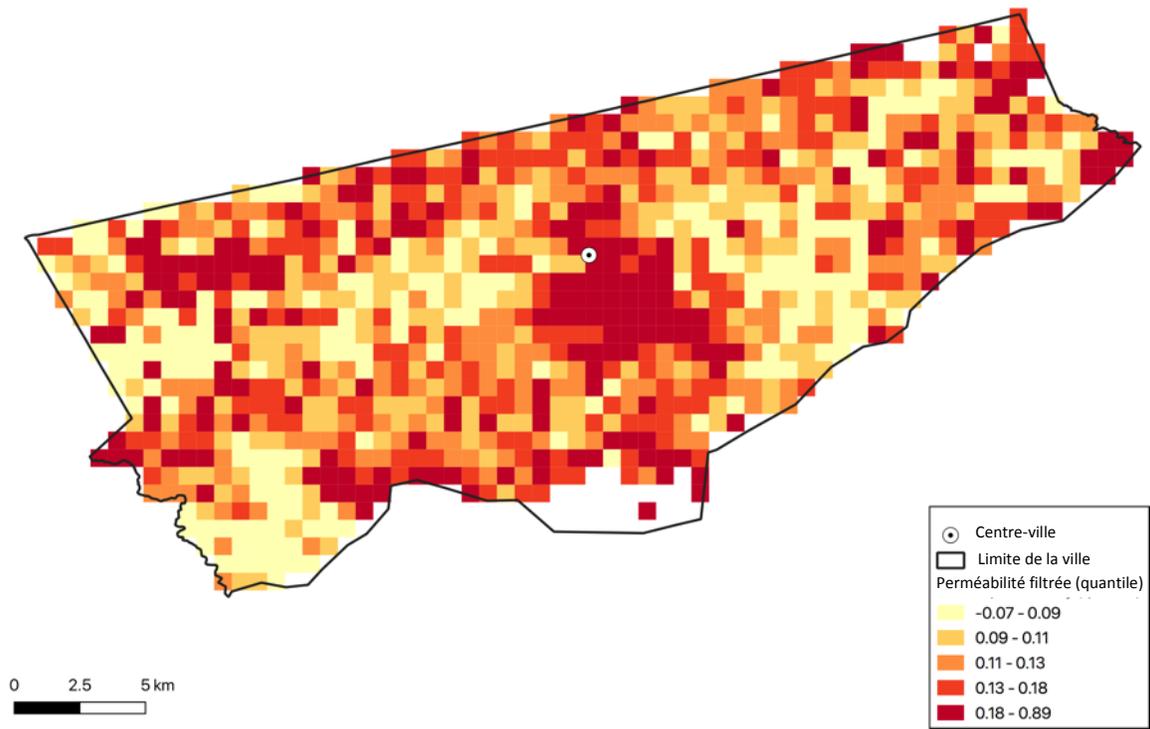


Figure 64. Perméabilité filtrée, Toronto (n = 1035 ; moyenne = 0,13 ; rang = 43/60)

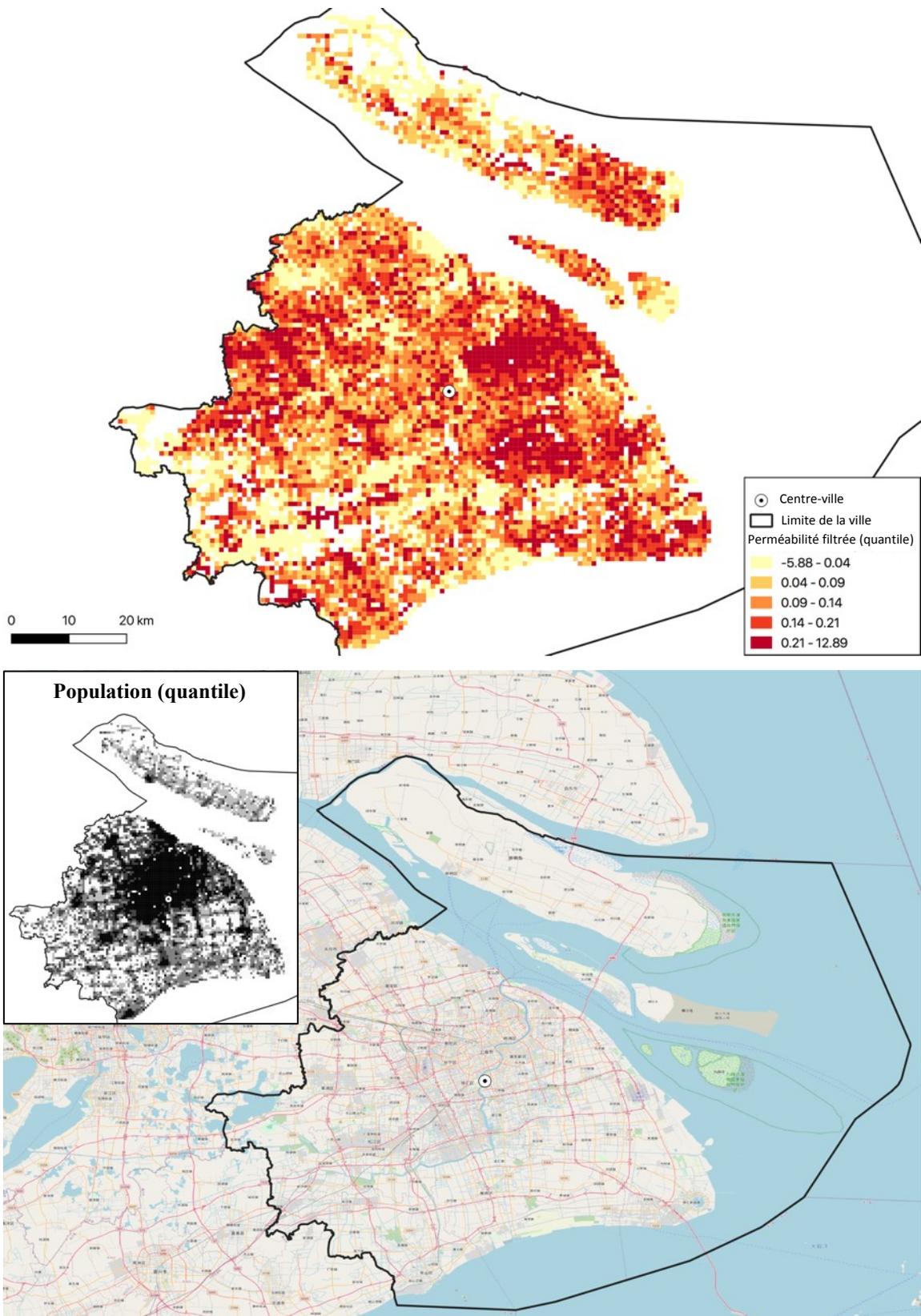


Figure 65. Perméabilité filtrée, Shanghai (n = 7642 ; moyenne = 0,13 ; rang = 44/60)

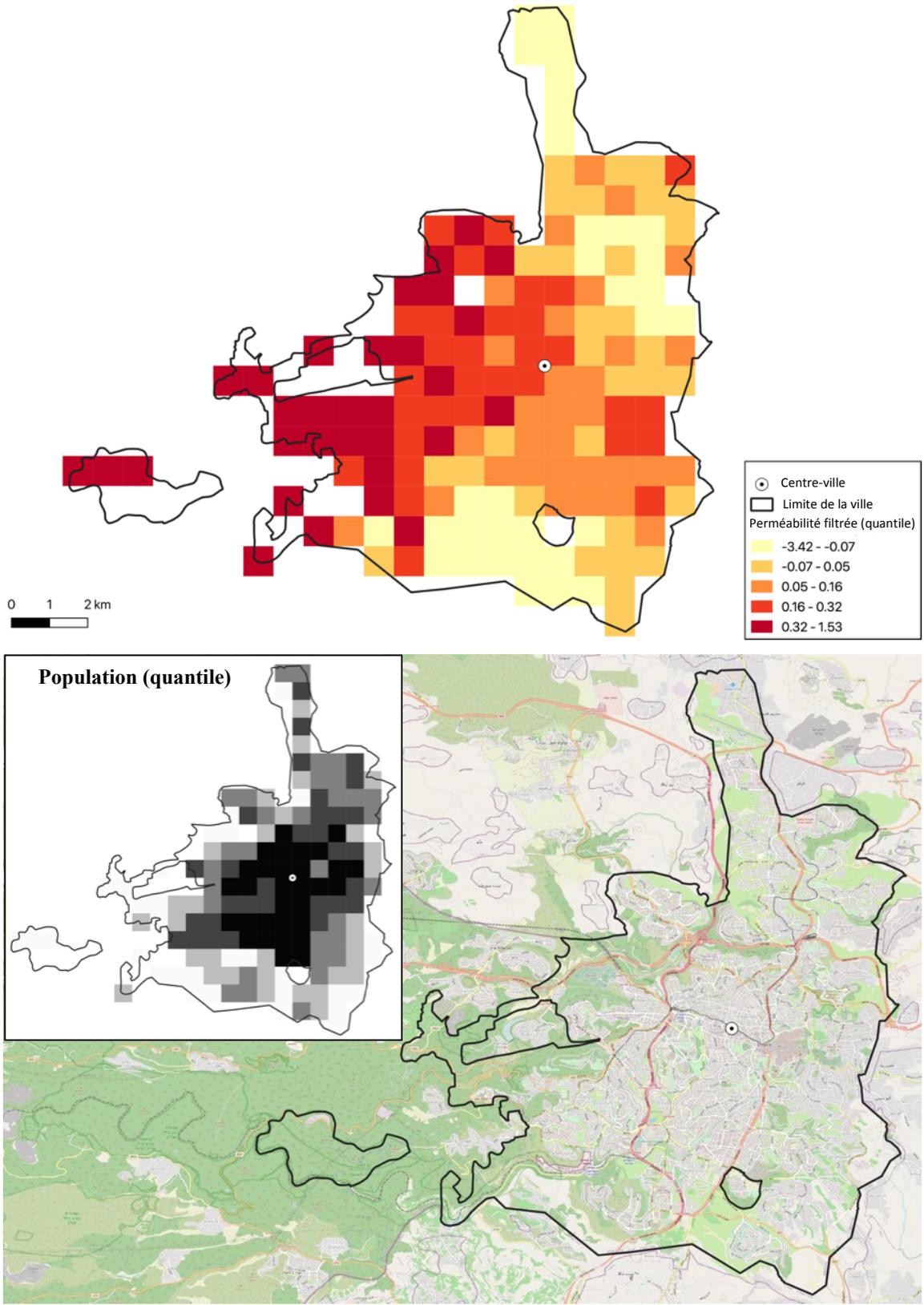


Figure 66. Perméabilité filtrée, Jérusalem (n = 156 ; moyenne = 0,13 ; rang = 45/60)

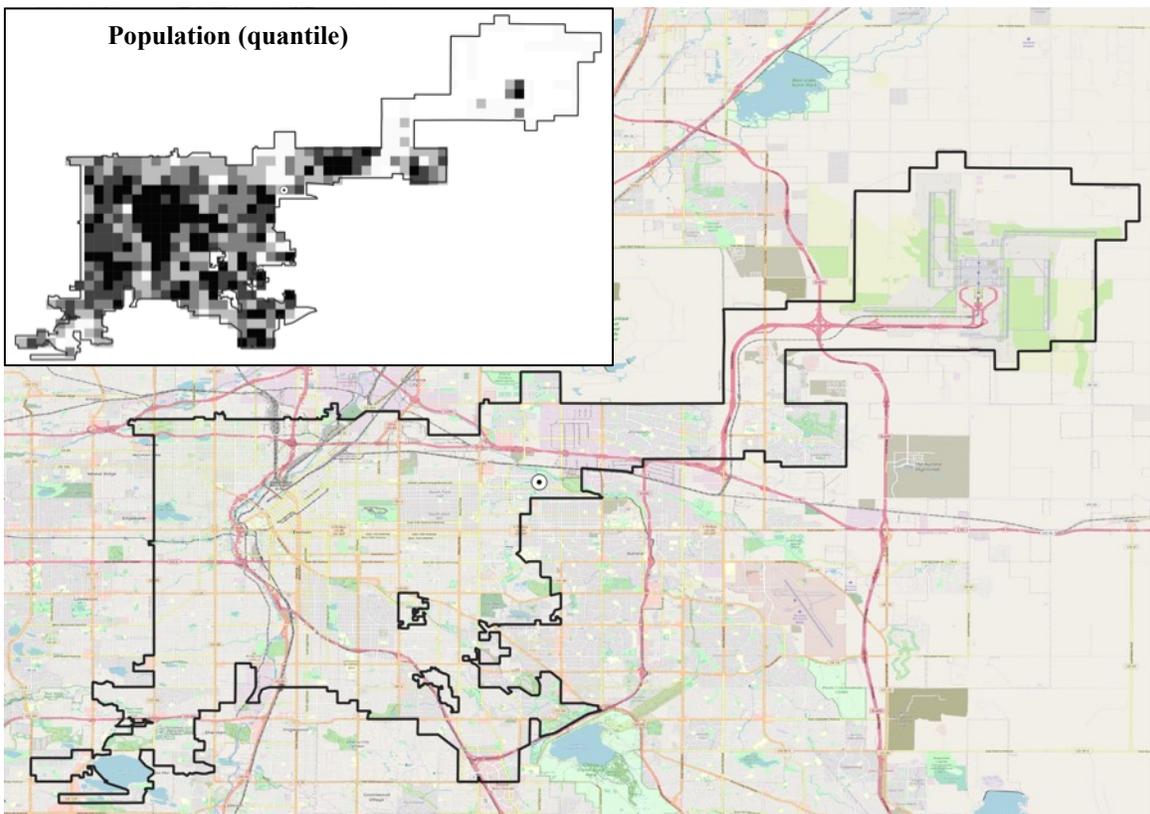
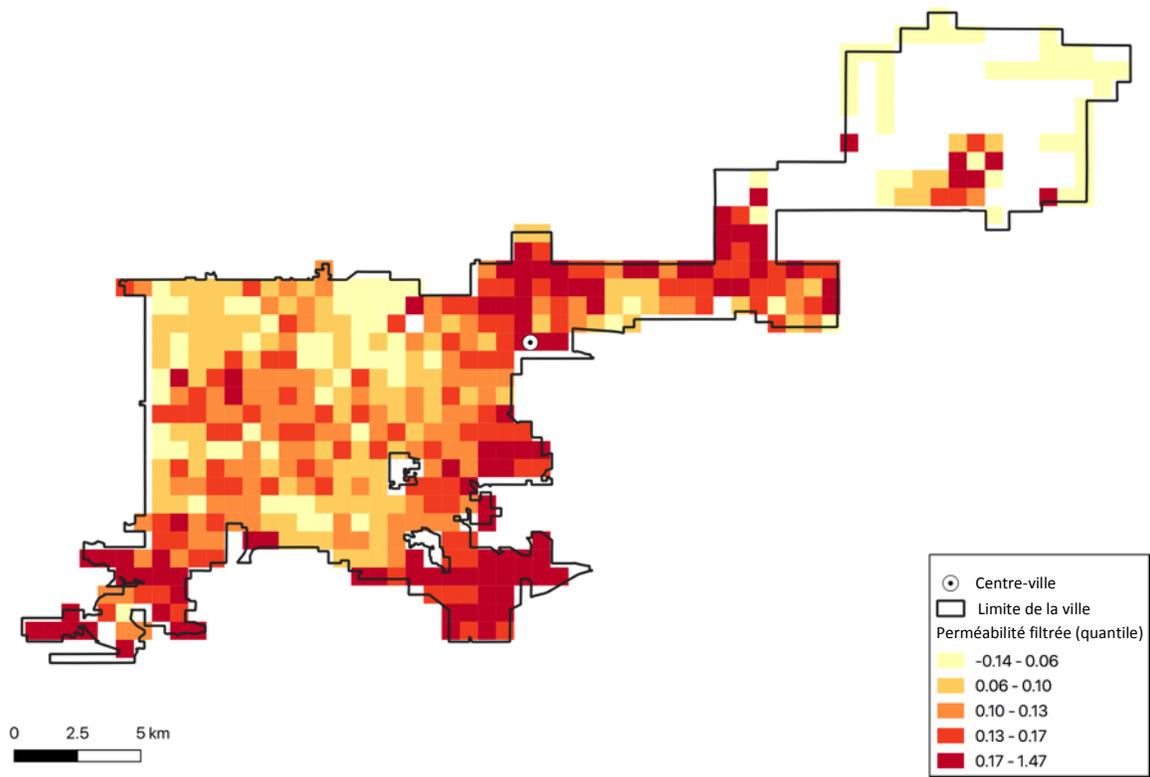


Figure 67. Perméabilité filtrée, Denver (n = 504 ; moyenne = 0,12 ; rang = 46/60)

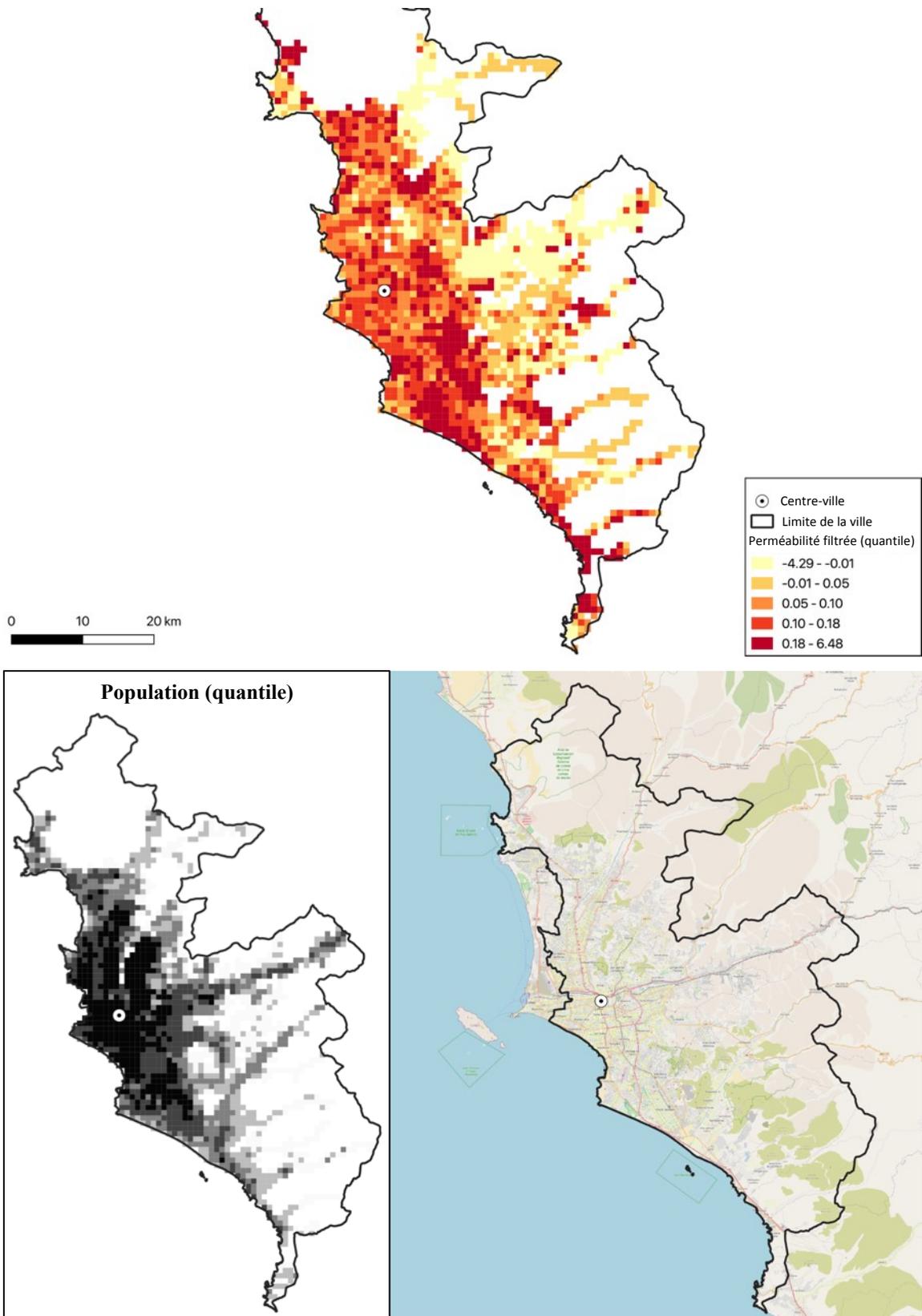


Figure 68. Perméabilité filtrée, Lima (n = 1786 ; moyenne = 0,12 ; rang = 47/60)

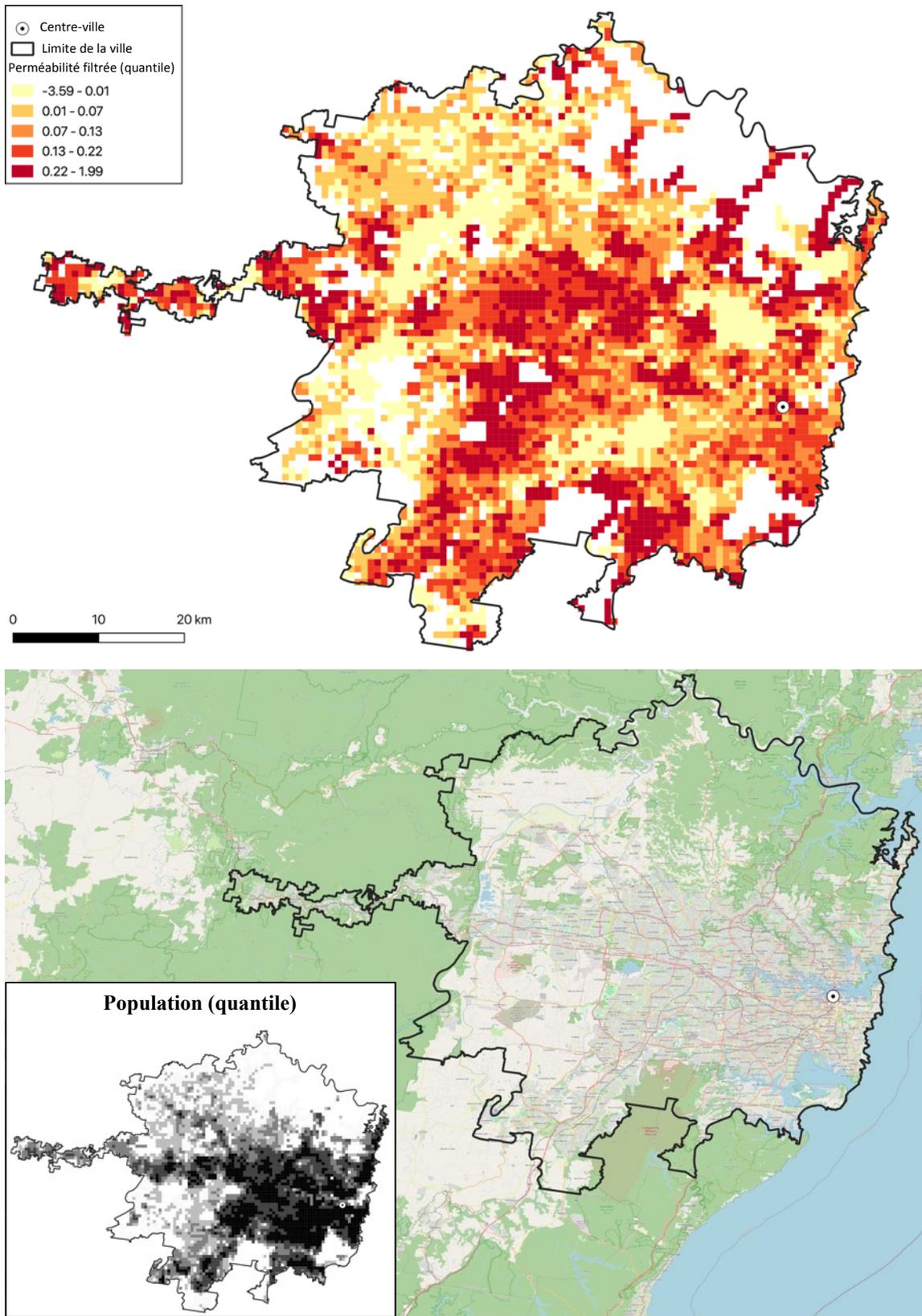


Figure 69. Perméabilité filtrée, Sydney (n = 4668 ; moyenne = 0,12 ; rang = 48/60)

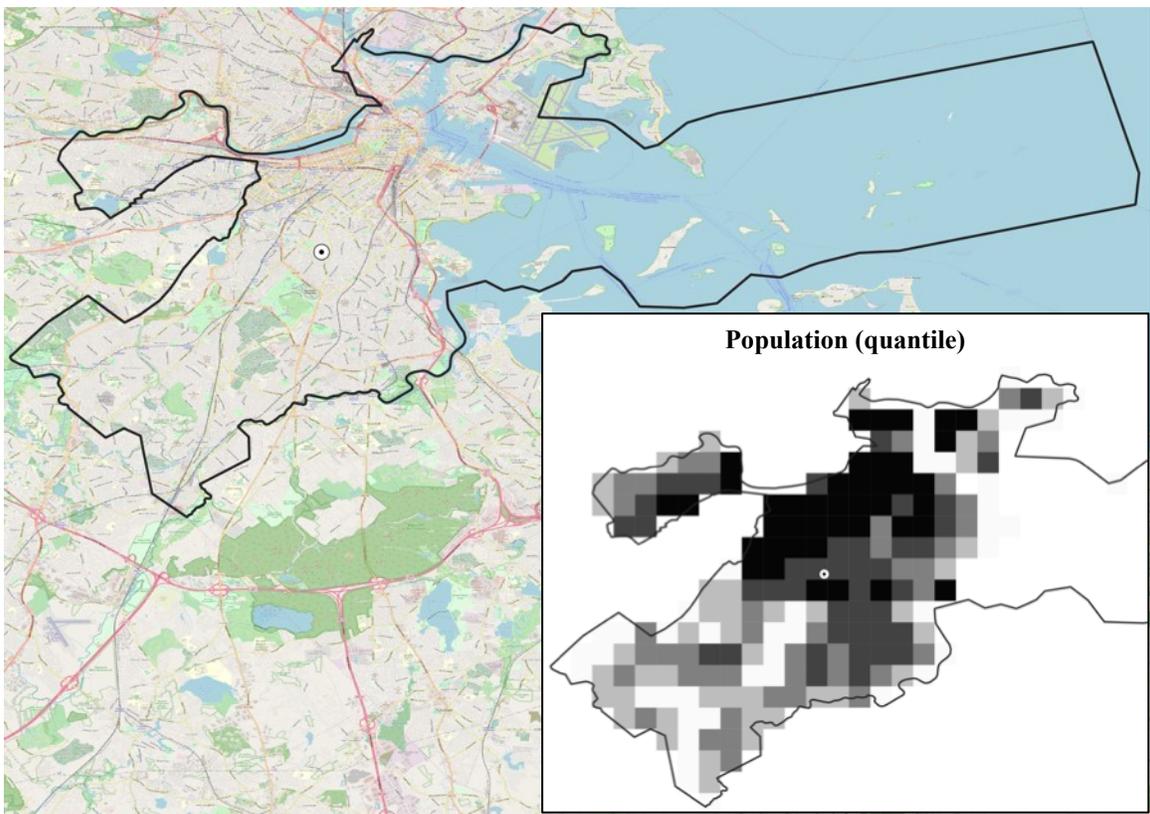
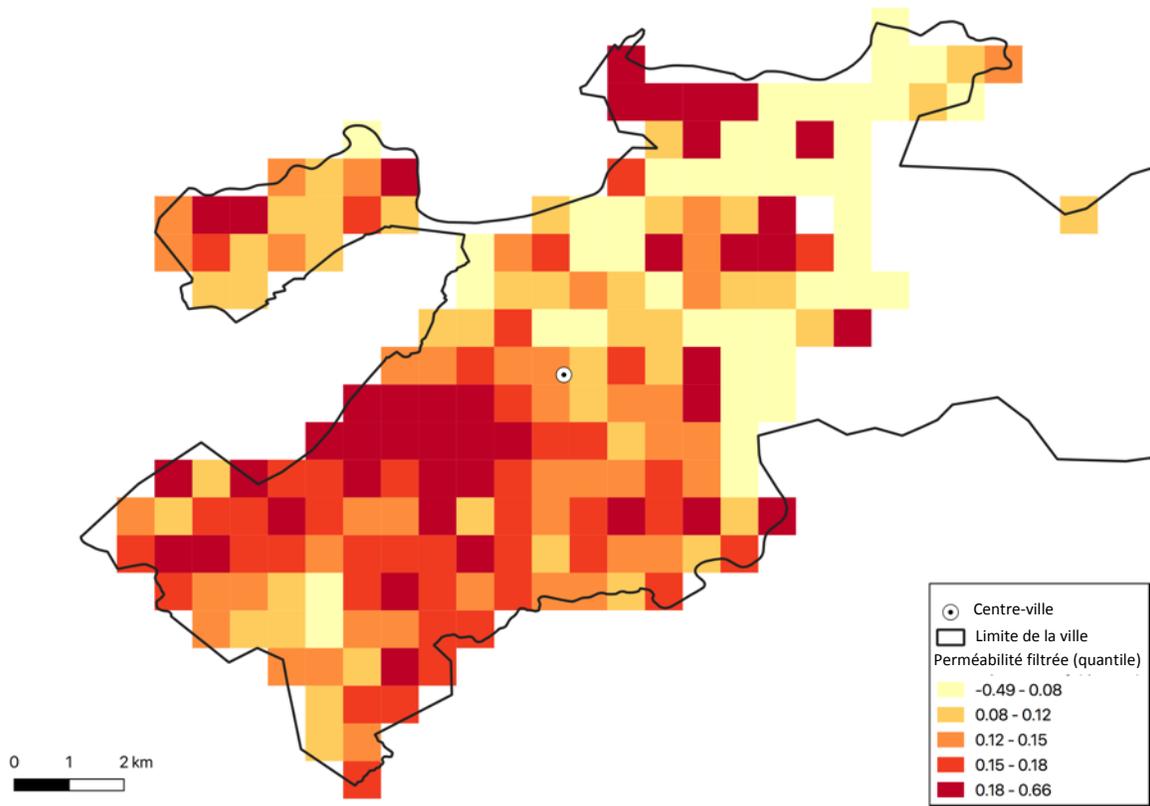


Figure 70. Perméabilité filtrée, Boston (n = 211 ; moyenne = 0,11 ; rang = 49/60)

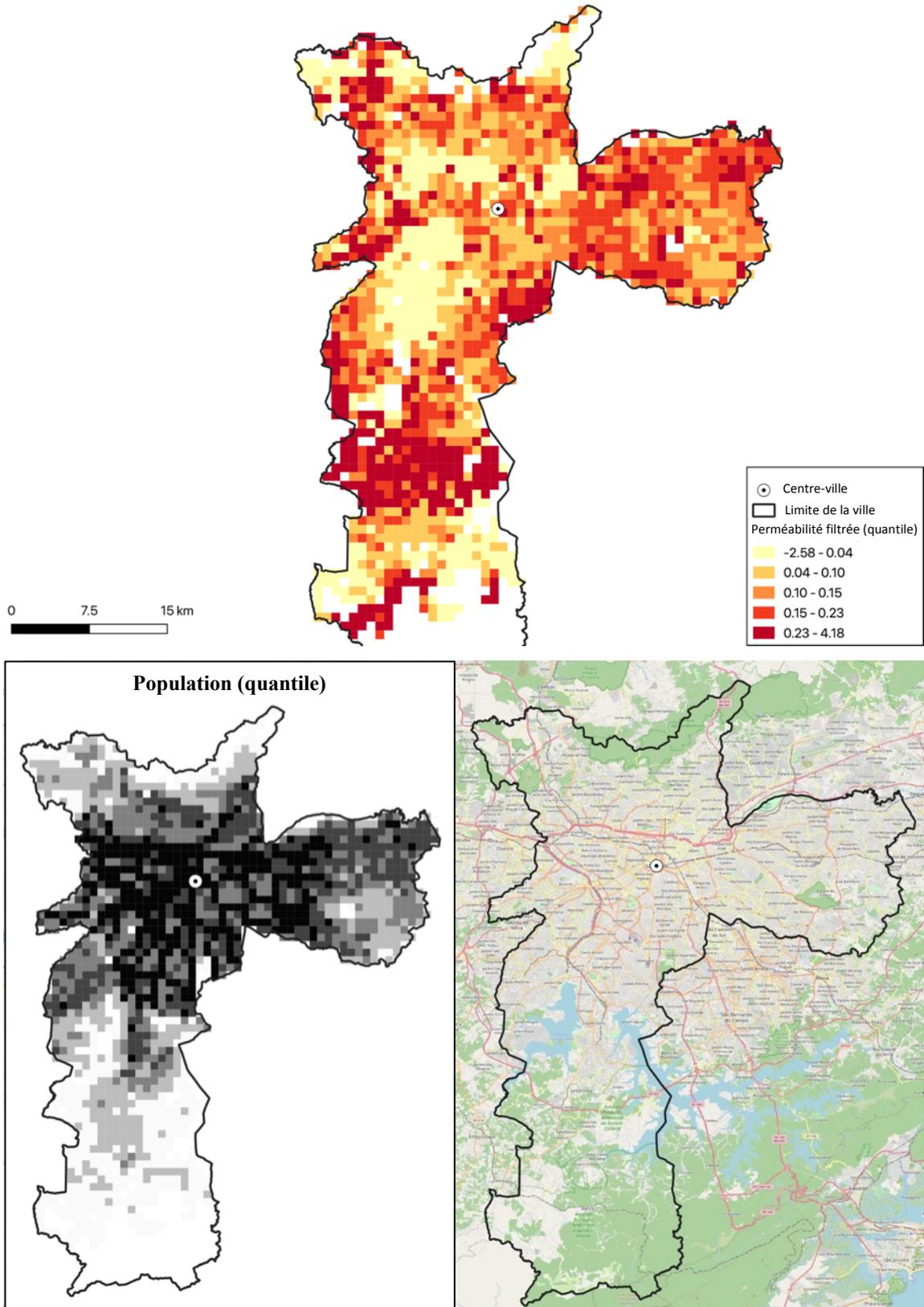


Figure 71. Perméabilité filtrée, São Paulo (n = 1673 ; moyenne = 0,11 ; rang = 50/60)

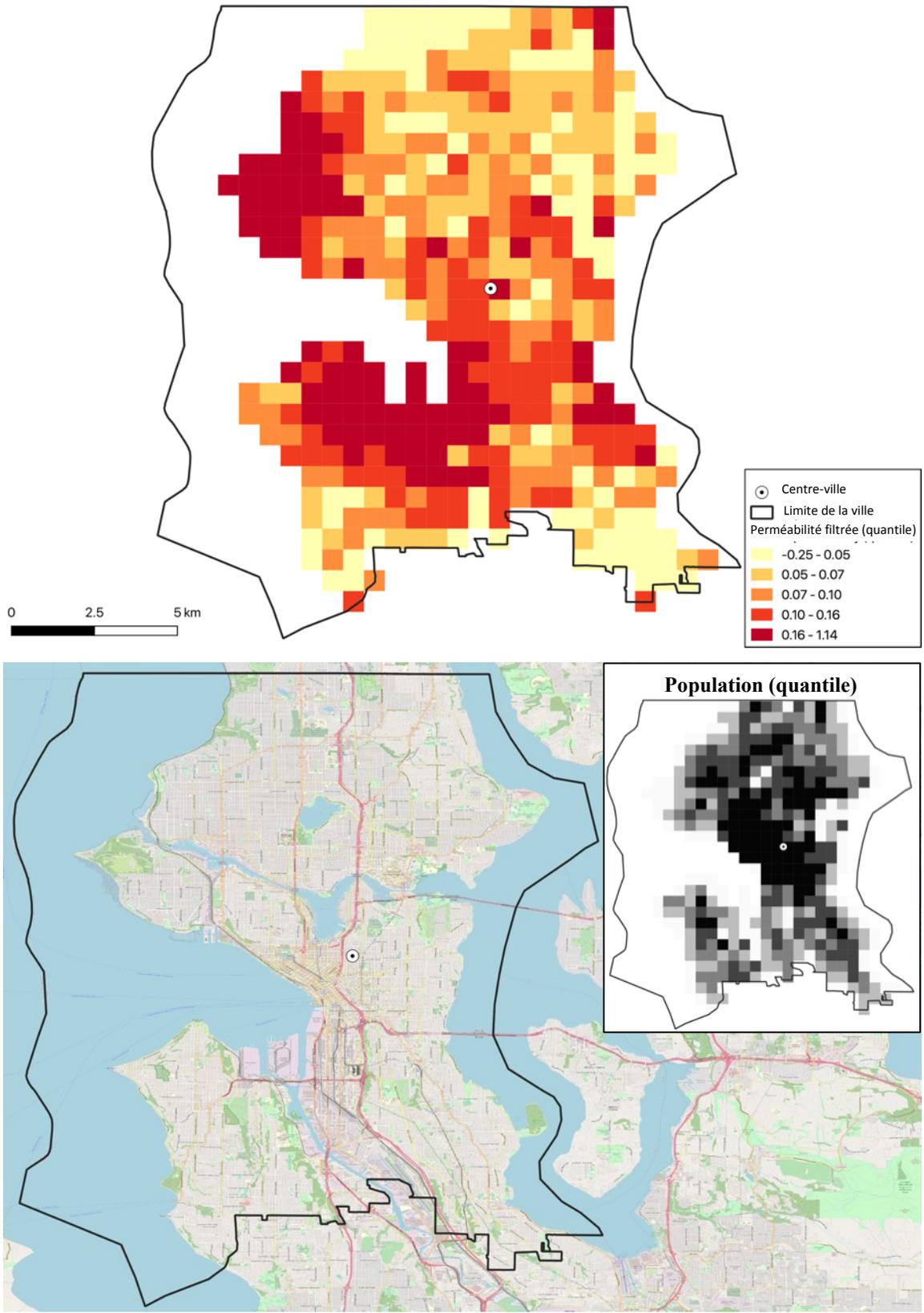


Figure 72. Perméabilité filtrée, Seattle (n = 426 ; moyenne = 0,11 ; rang = 51/60)

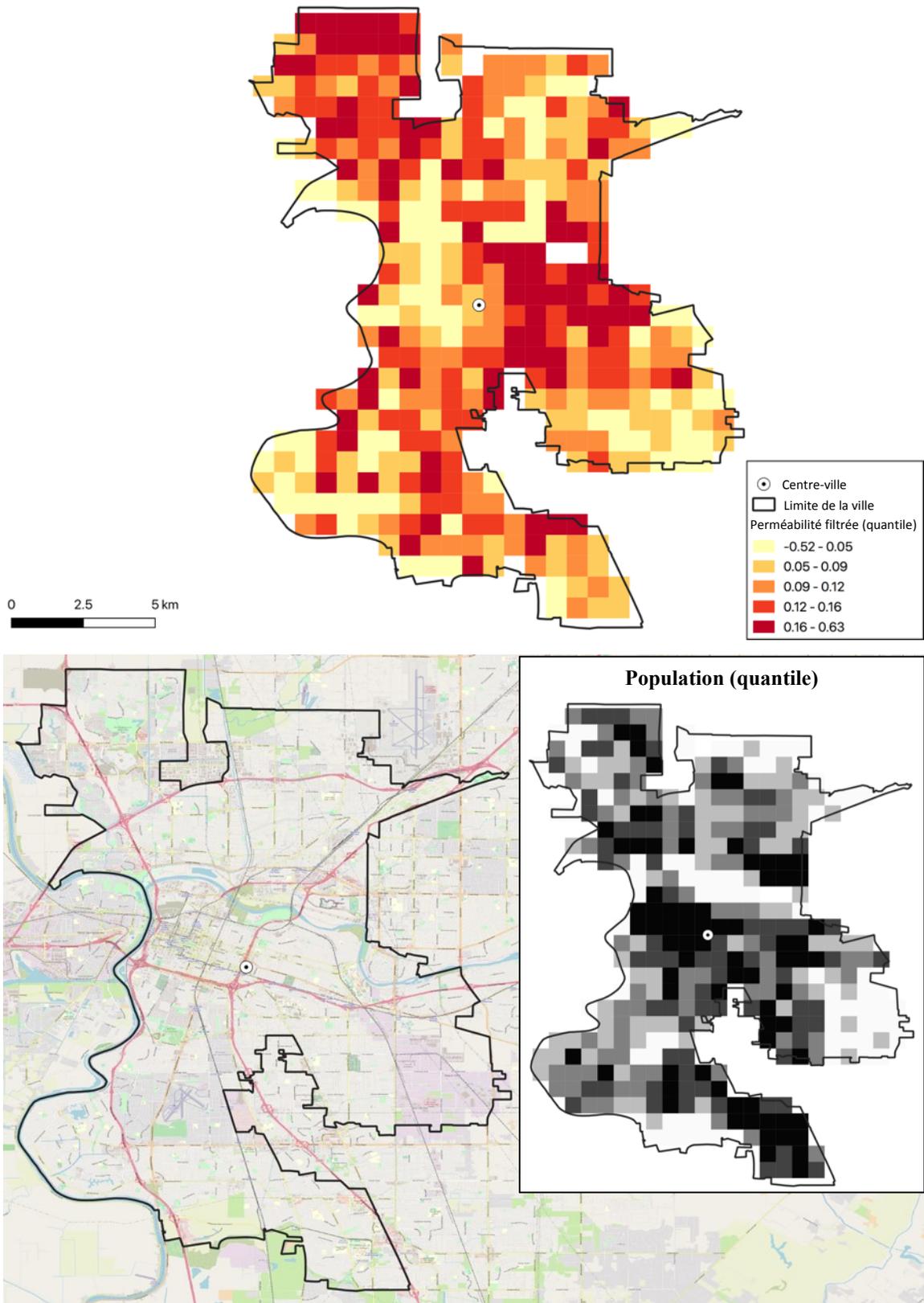


Figure 73. Perméabilité filtrée, Sacramento (n = 377 ; moyenne = 0,11 ; rang = 52/60)

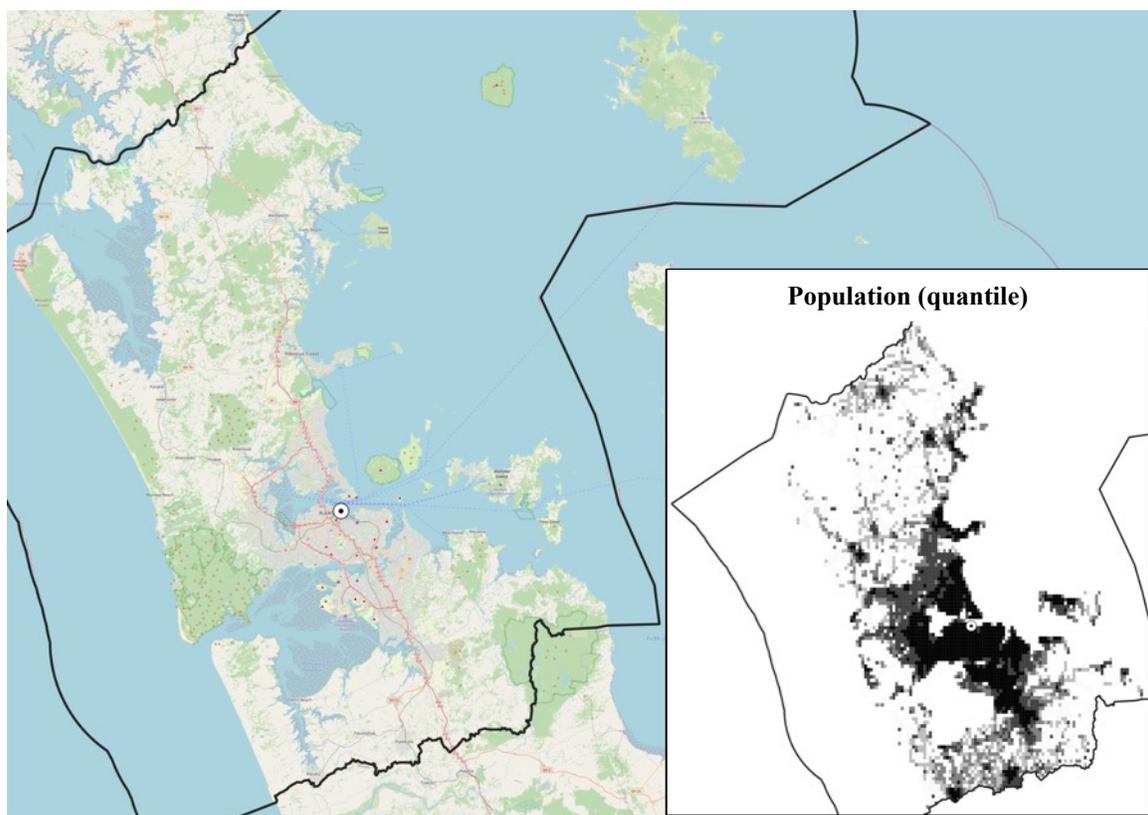
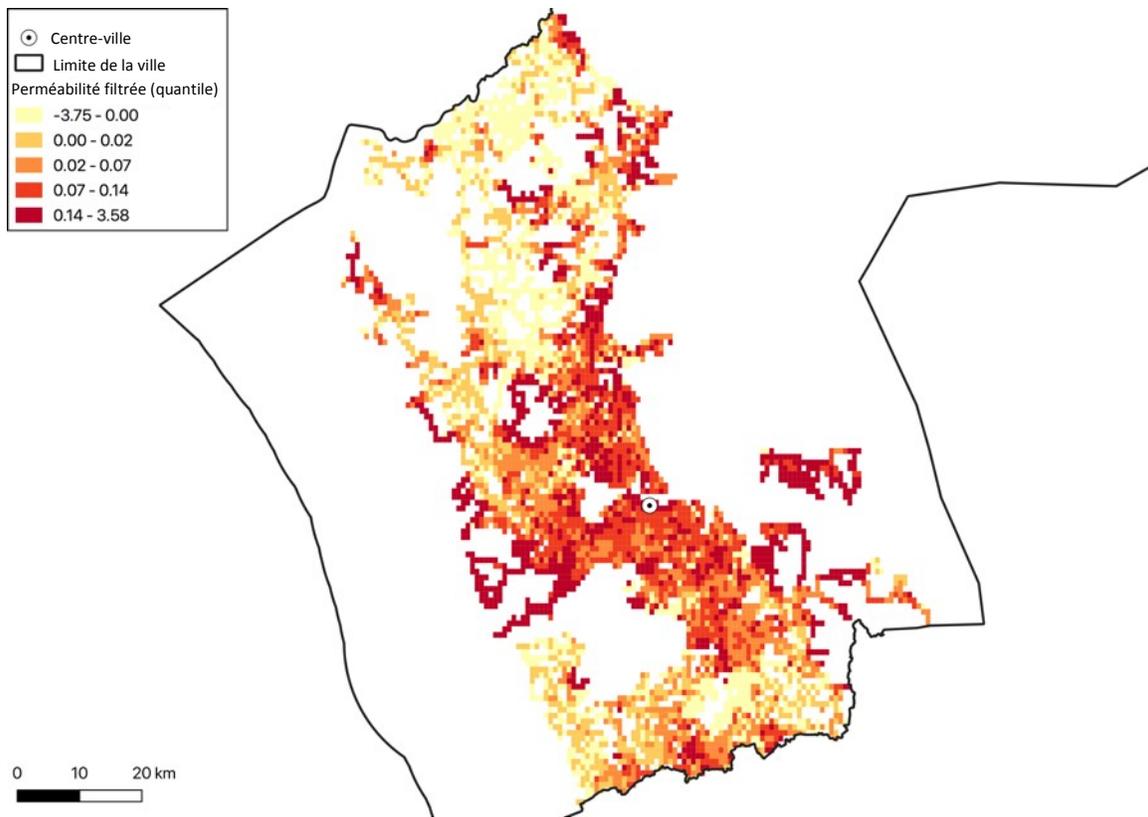


Figure 74. Perméabilité filtrée, Auckland (n = 4644 ; moyenne = 0,11 ; rang = 53/60)

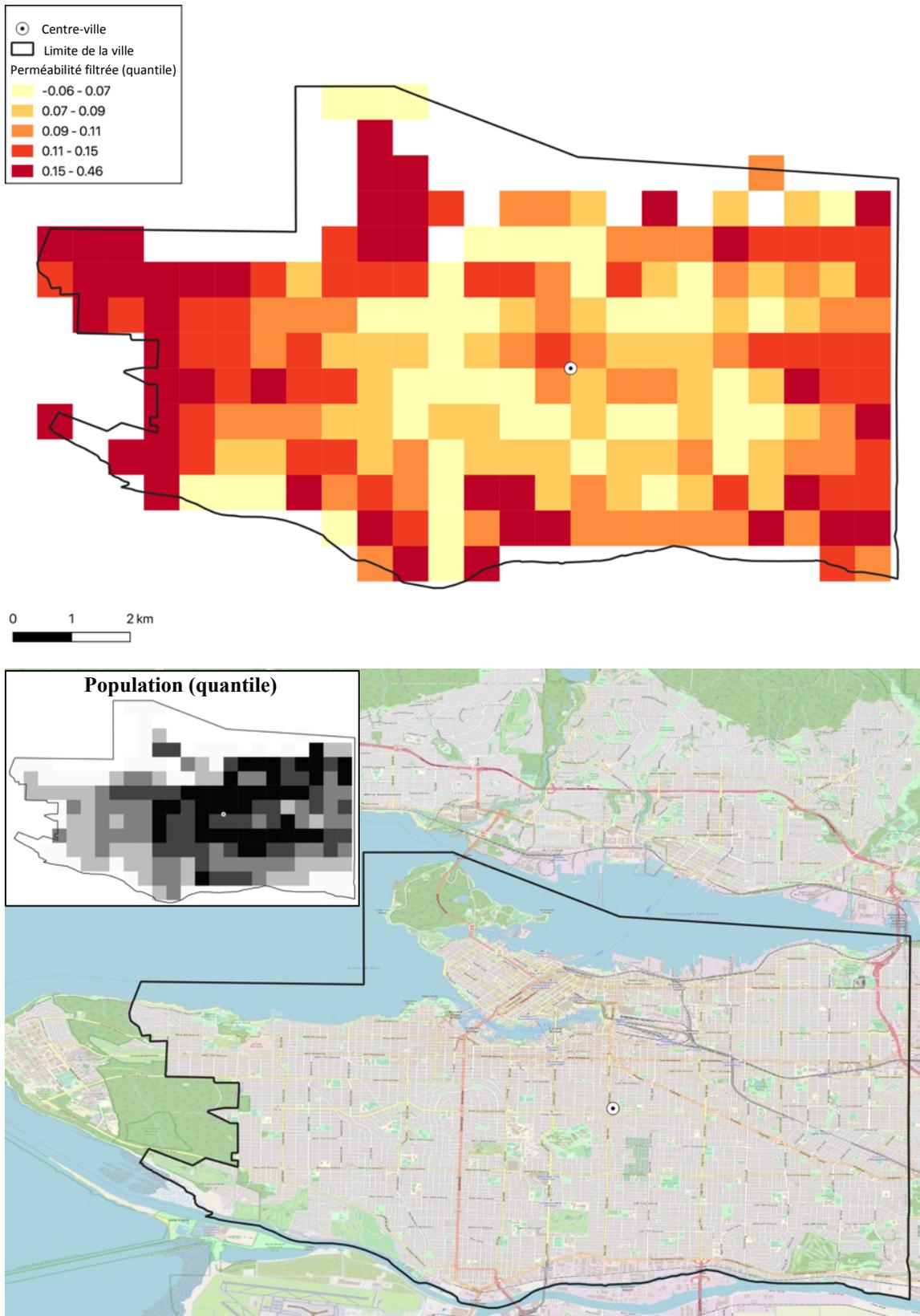


Figure 75. Perméabilité filtrée, Vancouver (n = 212 ; moyenne = 0,10 ; rang = 54/60)

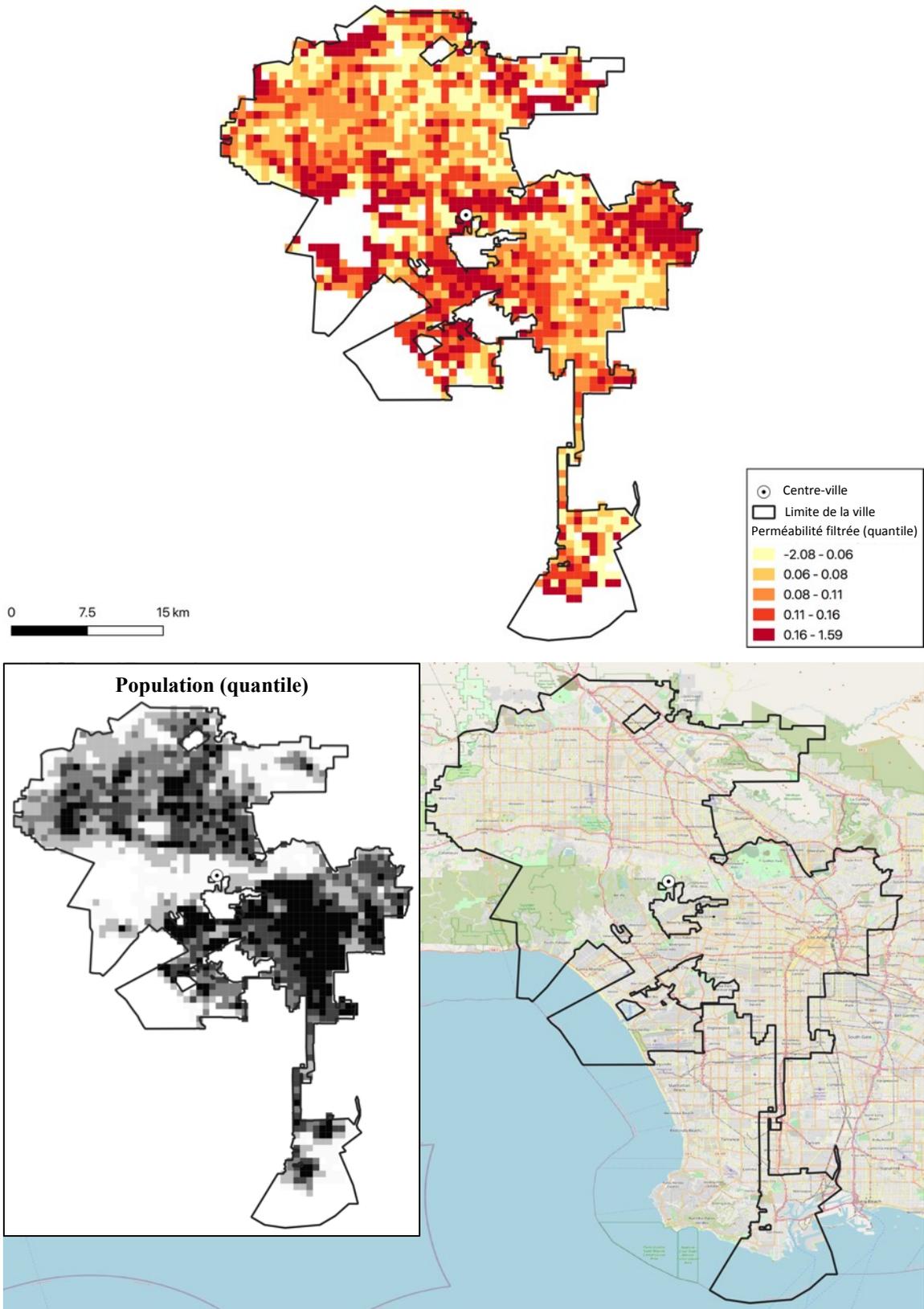


Figure 76. Perméabilité filtrée, Los Angeles (n = 1629 ; moyenne = 0,10 ; rang = 55/60)

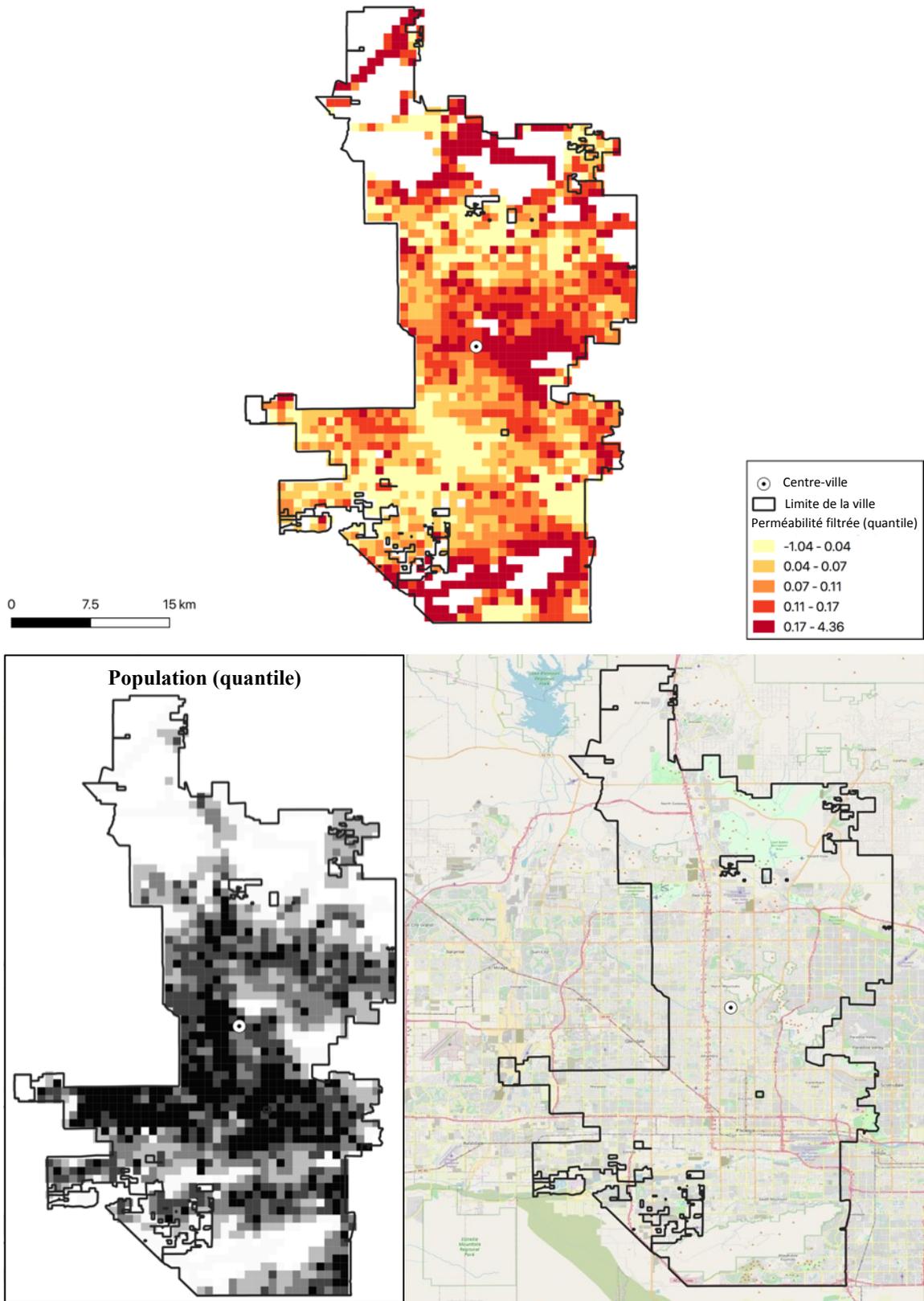


Figure 77. Perméabilité filtrée, Phoenix (n = 1569 ; moyenne = 0,08 ; rang = 56/60)

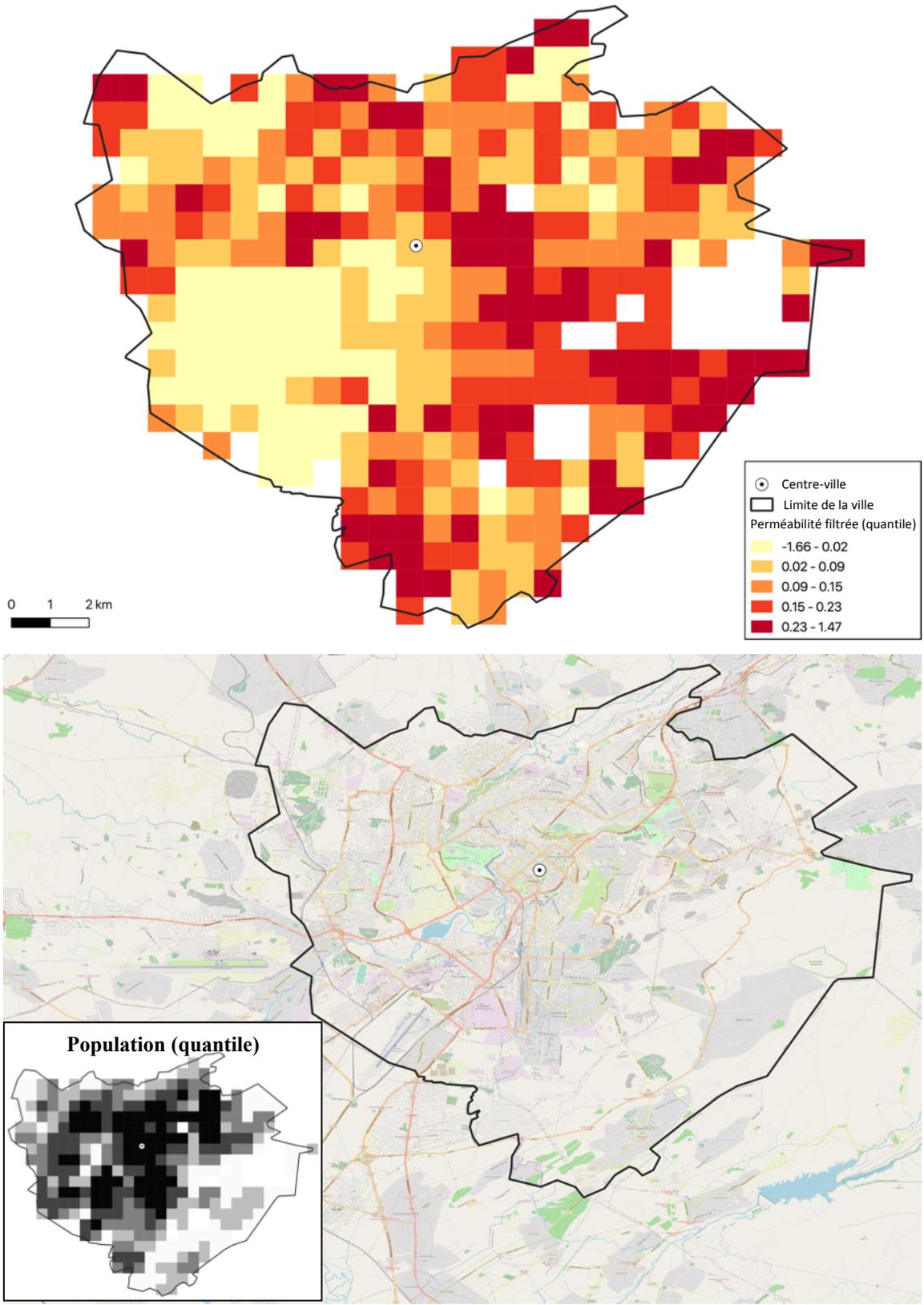


Figure 78. Perméabilité filtrée, Erevan (n = 351 ; moyenne = 0,07 ; rang = 57/60)

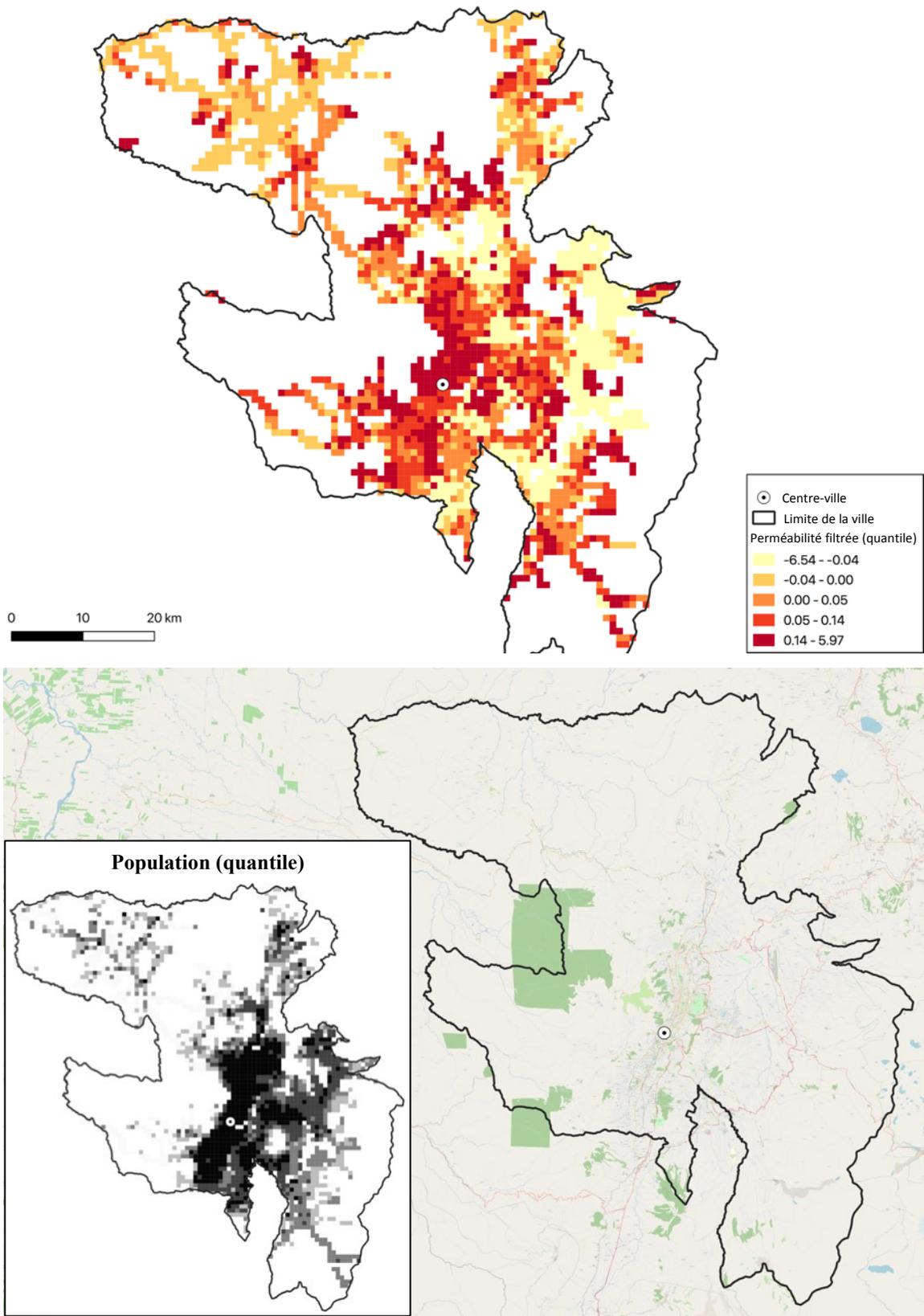


Figure 79. Perméabilité filtrée, Quito (n = 2159 ; moyenne = 0,07 ; rang = 58/60)

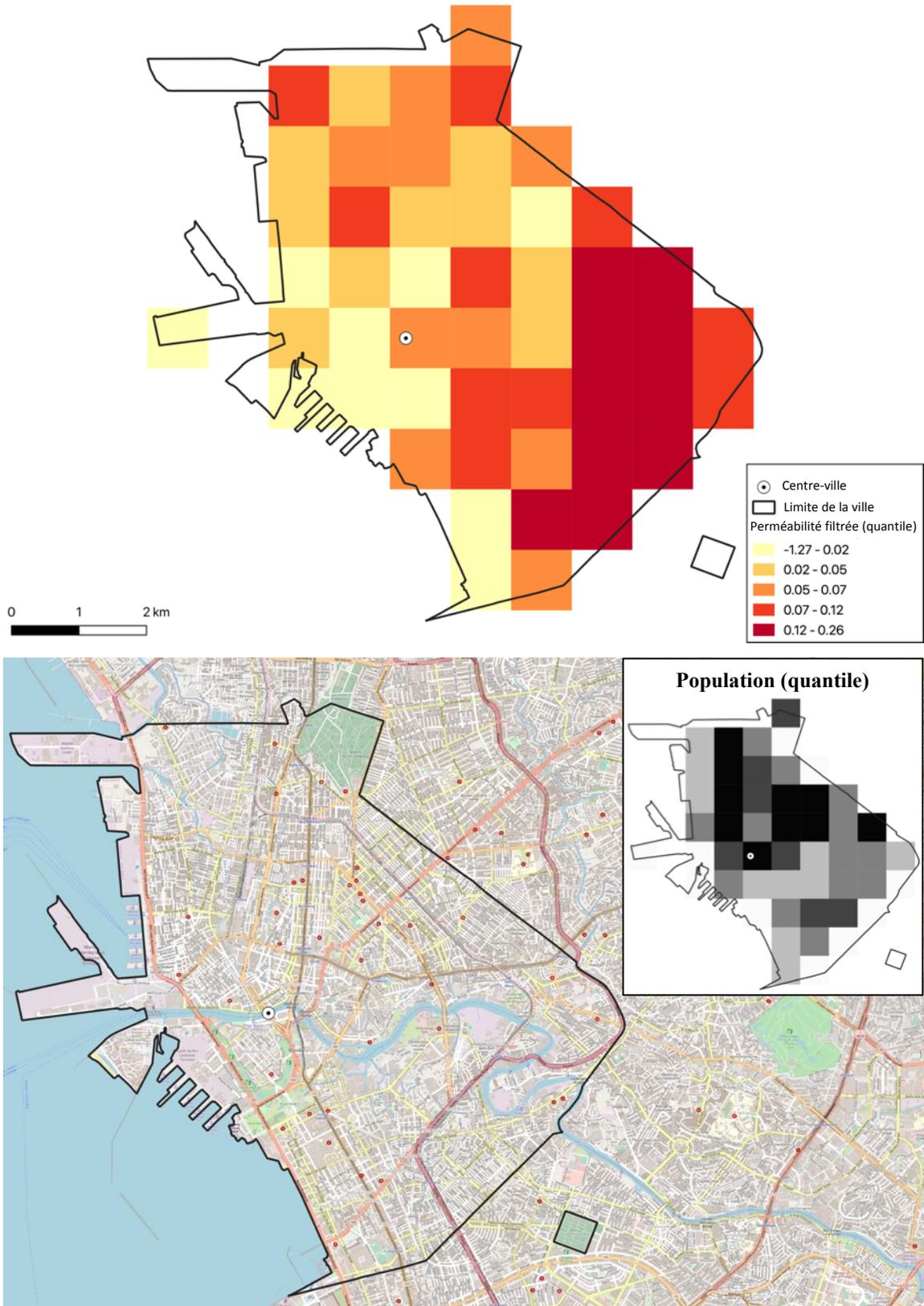


Figure 80. Perméabilité filtrée, Manille (n = 50 ; moyenne = 0,06 ; rang = 59/60)

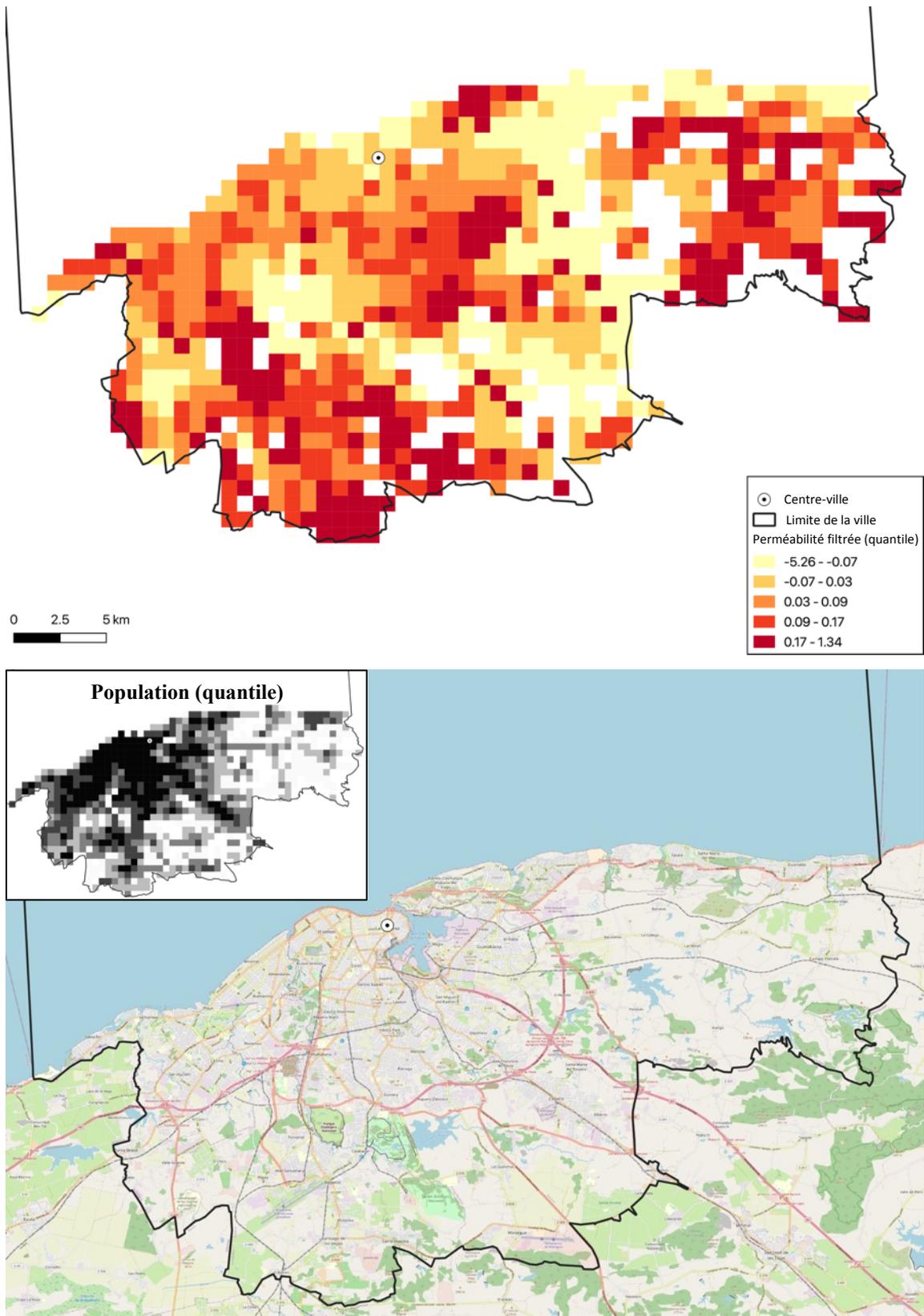


Figure 81. Perméabilité filtrée, La Havane (n = 831 ; moyenne = 0,02 ; rang = 60/60)