

DISTRIBUTION ÉQUITABLE DU COUVERT VÉGÉTAL À LAVAL

SEPTEMBRE 2025



FONDATION
DAVID SUZUKI
Un monde. Une nature.

COORDINATION ET RÉDACTION

Maxime Fortin Faubert, Ph. D., Stagiaire postdoctoral – Centre ETE de l'INRS et Fondation David Suzuki

Emma Taniguchi, Stagiaire Mitacs – Université Dalhousie

Carly Ziter, Ph. D., Professeure adjointe – Université Concordia

Christopher Greene, Ph. D., Enseignant principal – Université Dalhousie

RÉVISION LINGUISTIQUE

Cyrielle Maison, Spécialiste, communications et engagement du public - Fondation David Suzuki

MISE EN PAGE

Annie Trudeau, Graphiste – Fondation David Suzuki

REMERCIEMENTS

Les auteur.e.s souhaitent remercier Mitacs pour avoir contribué au soutien financier de la stagiaire Emma Taniguchi, par le biais du programme Accélération, pour la réalisation de cette étude. Ils et elles remercient également Hope Moon pour ses analyses préliminaires et Catherine Hallmich pour sa contribution à l'idéation du projet. Enfin, les auteur.e.s expriment leur gratitude à toutes les personnes qui ont participé à ce projet.

CITATION SUGGÉRÉE

Fortin Faubert, M.; Taniguchi, E.; Ziter, C.D. et Greene, C. 2025. *Distribution équitable du couvert végétal à Laval*. Fondation David Suzuki 28 p.

ISBN : 978-1-998631-05-6

FONDATION DAVID SUZUKI

Établie en 1990, la Fondation David Suzuki est un organisme sans but lucratif pancanadien et bilingue. Son siège social est à Vancouver et compte des bureaux à Montréal et Toronto. La Fondation a pour mission de protéger l'environnement et notre qualité de vie, maintenant et pour l'avenir. Le travail de la Fondation contribue à résoudre la crise climatique et la disparition massive des espèces en mettant l'accent sur trois volets essentiels : solutions climatiques, nature florissante et collectivités durables. Par la science, la sensibilisation, l'analyse de politiques d'intérêt public et l'engagement du public, et des partenariats avec les entreprises, les gouvernements et les acteurs de la société civile, la Fondation oeuvre à définir et à mettre en place des solutions permettant de vivre en équilibre avec la nature. La Fondation David Suzuki compte sur l'appui de plus de 300 000 sympathisant.e.s à travers le Canada, dont près de 100 000 au Québec.

Pour toute demande de renseignements, veuillez communiquer avec la Fondation David Suzuki :

540 – 50, rue Sainte-Catherine Ouest

Montréal, QC H2X 3V4

514-871-4932

fr.davidsuzuki.org

RÉSUMÉ

Les infrastructures vertes fournissent des services écosystémiques essentiels, notamment la régulation des températures urbaines et de la pollution atmosphérique, la gestion des eaux pluviales et le soutien à la biodiversité. En outre, ces éléments naturels réduisent le stress, améliorent l'humeur des gens et encouragent l'activité physique, contribuant ainsi au bien-être général de la population urbaine. Cependant, vu la croissance continue de la population mondiale, de nombreuses villes connaissent une urbanisation et une intensification rapides. Il n'est pas rare que le développement urbain empiète sur les espaces verts qui sont essentiels à la santé et au bien-être des citadins. Ces situations peuvent exacerber les inégalités environnementales subies par les populations marginalisées.

Cette étude compare la répartition du couvert végétal total de la municipalité de Laval avec celle de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), afin de déterminer si les tendances en matière d'inégalités observées dans d'autres villes sont aussi présentes dans cette municipalité historiquement jeune. L'étude a fait appel à des approches de régression linéaire (i.e., moindres carrés ordinaires et la régression pondérée géographiquement) ainsi qu'à des méthodes d'analyse d'agrégats spatiaux (i.e., Getis-Ord local GI* et Local bivariate Moran's I), dans le but de mieux comprendre la répartition spatiale des variables étudiées.

Les résultats analytiques ont révélé une corrélation importante entre le couvert végétal total et les scores de marginalisation à travers Laval. Ces données mettent en lumière une inégalité marquée de la végétation, laquelle constitue un bien environnemental important. Dans les quartiers les plus marginalisés, qui sont souvent situés à proximité du centre-ville, le couvert végétal est moins important que dans les quartiers moins densément peuplés présentant des scores de marginalisation plus bas, particulièrement dans le nord de Laval. Des agrégats spatiaux importants, où des scores de marginalisation élevés coïncidaient avec un couvert végétal réduit, ont aidé à identifier les zones prioritaires pour les interventions futures visant à réduire les inégalités écologiques.

Pour remédier à ces inégalités et améliorer la justice environnementale, les recommandations de la présente étude préconisent la conservation, l'expansion et la mise en place d'infrastructures vertes dans les secteurs très marginalisés. Cela peut être réalisé en privilégiant des solutions fondées sur la nature, notamment via des projets de déminéralisation (p. ex. enlèvement de l'asphalte) ou des phytotechnologies, comme les noues végétalisés, les pavés végétalisés et les bassins de biorétenzione. Ces mesures permettent d'augmenter le couvert végétal tout en améliorant la quantité et la qualité des services écosystémiques. En outre, la conversion de terrains vacants en parcs publics ou en espaces verts institutionnels peut apporter des bienfaits écologiques et sociaux considérables. Les décisionnaires sont appelés à considérer les avantages des espaces verts naturels au lieu des espaces verts entretenus, dans le but de maximiser les bienfaits pour les résident.e.s.

La présente étude a pour but d'aider la municipalité de Laval et la CMM à atteindre leurs objectifs socioécologiques de manière équitable. Elle a été réalisée avec l'espoir que les questions d'équité soient prises en compte dans de nouveaux documents stratégiques sur la planification urbaine, les enjeux climatiques et la perte de biodiversité, comme le *Plan climat* et le *Plan métropolitain d'aménagement et de développement* (PMAD). Il est crucial de tenir compte de la justice environnementale dans la planification urbaine et de mettre en place des stratégies ciblées pour améliorer la répartition de la végétation dans les quartiers marginalisés. Grâce à des efforts concertés pour accroître la végétation urbaine et préserver celle qui existe déjà, il sera possible de créer des environnements urbains plus résilients et plus équitables, ce qui améliorera le bien-être de l'ensemble de la population.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	4
LISTE DES TABLEAUX.....	6
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	7
INTRODUCTION.....	8
MÉTHODOLOGIE	9
Données d'entrée	9
Zones de l'étude	9
Configuration des données	9
Variable 1 — Pourcentage de couvert végétal total par aire de di fusion (variable dépendante)	9
Variable 2 – Score de marginalisation par aire de di fusion : Québec (variable indépendante)	9
Analyse approfondie	10
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	11
Observations préliminaires sur la distribution spatiale des variables.....	11
Régression des moindres carrés ordinaires (OLS).....	11
Analyse de points chauds (Getis-Ord local GI*).....	12
Régression pondérée géographiquement (GWR)	13
Indice local I de Moran bivarié	14
Profil général des agrégats « High-Low »	17
Mise en place de nouvelles infrastructures végétalisées.....	18
Conservation et expansion des infrastructures végétalisées existantes.....	19
Considérations pour la planification d'infrastructures végétalisées.....	21
Limites de l'étude.....	22
CONCLUSION	23
BIBLIOGRAPHIE.....	24
ANNEXE	27

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données spatiales utilisées.....	9
Tableau 2. Type d'utilisation du sol et couverture de la canopée dans les agrégats « High-Low » à travers Laval, dans un contexte local.....	17
Tableau 3. Type d'utilisation du sol et couverture de la canopée dans les agrégats « High-Low » à travers Laval, dans le contexte de la CMM.....	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Couvert végétal à travers la CMM, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.....	11
Figure 2. Score de marginalisation à travers la CMM, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval	12
Figure 3. Résidus standardisés résultant d'une régression OLS.....	13
Figure 4. Points chauds et points froids du score de marginalisation à Laval.....	14
Figure 5. Points chauds et points froids du couvert végétal total à Laval.....	15
Figure 6. Résidus standardisés résultant d'une GWR	15
Figure 7. Carte des agrégats spatiaux à Laval, identifiés selon l'indice local I de Moran bivarié	16
Figure 8. Aires de di fusion « High-Low » significatives superposées à l'Indice canopée métropolitain.....	19
Figure 9. Aires de di fusion « High-Low » significatives superposées aux données de l'utilisation du sol métropolitain.....	20
Figure S1. Secteurs géographiques de la CMM.....	27
Figure S2. Densité de population, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.....	27
Figure S3. Utilisation du sol métropolitain, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval	28

LISTE DES ABRÉVIATIONS

(Les termes en italique sont en anglais)

AD	Aire de diffusion
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i>
GWR	<i>Geographically Weighted Regression</i> (Régression pondérée géographiquement)
MAUP	<i>Modifiable Areal Unit Problem</i> (Problème d'unité d'aire modifiable)
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
MTM	Projection Mercator transverse modifiée
NAD83	Système de référence nord-américain de 1983
OLS	<i>Ordinary Least Squares</i> (Moindres carrés ordinaires)
PMAD	Plan métropolitain d'aménagement et de développement
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
QC	Québec
SCRS	Système canadien de référence spatiale
SHP	Shapefile
TIF	<i>Tagged Image File Format</i>
XLSX	Feuille de calcul Excel au format Microsoft Office Open XML

INTRODUCTION

En raison de la croissance continue de la population mondiale (Ritchie et al., 2023), beaucoup de villes et de quartiers connaissent un taux d'urbanisation et de densification très élevé. Ce processus exerce souvent des pressions sur les espaces verts qui font partie du tissu social urbain, tout en entraînant une concurrence pour ceux-ci, ce qui nuit potentiellement à la santé et au bien-être de la population urbaine(Ambrey, 2016; Song et al., 2021; Yao et al., 2024). Selon de nombreuses études, le fait de passer du temps à l'extérieur, particulièrement dans des espaces verts, améliore le bien-être et la santé mentale globale des individus(Colley et al., 2016; Ferguson, 2019; Song et al., 2021; Wu et al., 2023; Yao et al., 2024). Plus précisément, il a été démontré que la fréquentation d'espaces verts urbains réduit les niveaux de stress perçu et physiologique, améliore l'humeur et la vitalité et restaure la capacité d'attention(Colley et al., 2016; Yao et al., 2024). Si des espaces verts leur sont accessibles, les gens sont également plus enclins à faire de l'activité physique en plein air (Ambrey, 2016; Frumkin et al., 2017). Ainsi, les villes offrant de nombreux espaces naturels contribuent de cette façon au bien-être des résident.e.s. Par ailleurs, il a été démontré que l'augmentation du nombre d'arbres et d'espaces verts atténue beaucoup de facteurs de stress environnementaux liés à la vie dans un secteur fortement urbanisé, comme l'effet d'îlot de chaleur, la pollution atmosphérique et sonore ainsi que les inondations(Livesley et al., 2016; Ziter et al., 2019). Même s'il est bien connu que la végétation urbaine contribue à la santé et au bien-être des gens, les villes tendent généralement à réduire leurs niveaux de verdissement à mesure que l'urbanisation augmente. Par exemple, le verdissement urbain aurait diminué de près de 10 % dans des villes de toutes les provinces canadiennes au cours des dernières décennies (Statistics Canada, 2022).

Il est bien établi que les espaces verts urbains, et par conséquent les avantages qui y sont associés, sont répartis de manière inéquitable, et que les communautés défavorisées y ont moins accès. Ce phénomène est souvent appelé l'« effet de luxe » (Leong et al., 2018). Dans les villes états-unies, où la majorité des recherches en ce sens ont été effectuées, les quartiers aisés à prédominance blanche sont souvent ceux qui jouissent de la végétation la

plus abondante(Gerrish et Watkins, 2018; Schell et al., 2020; Watkins et Gerrish, 2018). Des analyses récentes de la relation entre les caractéristiques sociodémographiques et les espaces verts dans les villes canadiennes révèlent des tendances similaires, où la végétation est plus abondante au sein des communautés plus nanties et instruites (Quinton et al., 2022). Outre la quantité de végétation, les études montrent que la vulnérabilité sociale est associée à la diversité fonctionnelle des forêts, un indicateur de résilience, et que cette tendance se maintient dans toutes les villes(Landry et al., 2020). Ainsi, la quantité et la qualité des espaces verts urbains sont souvent réduites à proximité de communautés en quête d'équité.

Au Canada, les zones bâties ont augmenté de plus de 150 % depuis les années 1970. Cette expansion se produit plus rapidement que prévu en raison de l'accroissement de la population, ce qui contribue à l'étalement urbain (Pourali, 2021; Pourali et al., 2022). Comme Toronto, la ville de Montréal a connu des fusions avec plusieurs secteurs qui forment la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM), qui inclut maintenant la Couronne Nord, l'Agglomération de Montréal, l'Agglomération de Longueuil, la Couronne Sud et la ville de Laval (**Figure S1**). La division de la CMM en ces secteurs constitue une étude de cas intéressante sur la manière dont cette restructuration politique a pu influencer la démographie de la population et la répartition des espaces verts. Avoisinant l'île de Montréal au nord, Laval présente la particularité d'être densément peuplée à son extrémité sud, en bordure du centre-ville, tout en ayant un secteur agricole développé à sa frontière nord (**Figure S2** et **Figure S3**). Pour pallier l'insuffisance de données disponibles, cette étude visait à analyser la répartition du couvert végétal à Laval et à établir des comparaisons avec la CMM, afin de déterminer si l'iniquité en matière d'espaces verts observée dans d'autres villes est aussi une tendance présente dans cette municipalité relativement jeune.

MÉTHODOLOGIE

DONNÉES D'ENTRÉE

Toutes les données spatiales utilisées pour étudier la répartition du couvert végétal dans la ville de Laval et au sein de la CMM ont été obtenues en consultant des bases de données régionales, provinciales et fédérales ouvertes (**Tableau 1**). Toutes ces données ont été projetées dans un système de référence spatial commun avant l'analyse (NAD83 (SCRS) / MTM zone 8 (EPSG :2950), à l'aide des logicielles suivantes : R, version 4.3.1 (R Core Development Team, 2023) et Quantum GIS, version 3.34.1 (QGIS Development Team, 2023).

ZONES DE L'ÉTUDE

Les limites administratives officielles de la Ville de Laval et de la CMM ont été extraites sous forme de classes d'entités vectorielles (format ESRI *.shp) de la couche «Découpages administratifs 1/20000» (MRNF, 2024). Les limites de chaque aire de diffusion (AD) du recensement canadien de 2021 (Statistics Canada, 2021a) ont servi de base au reste de cette étude.

CONFIGURATION DES DONNÉES

VARIABLE 1 — POURCENTAGE DE COUVERT VÉGÉTAL TOTAL PAR AIRE DE DIFFUSION (VARIABLE DÉPENDANTE)

La couche de l'Indice canopée métropolitain (CMM, 2021) a été utilisée pour créer la variable dépendante de cette étude, représentant le pourcentage du couvert

végétal total à l'intérieur de chaque AD. La couche originale de l'Indice canopée métropolitain représente cinq classes de territoire sur une seule carte (i.e., Minéral bas, Végétal bas, Minéral haut, Végétal haut et Aquatique). Les principales opérations géométriques ont été réalisées dans une boucle, où, pour chaque AD, la couche matricielle de l'Indice canopée métropolitain a été découpée à son étendue à l'aide de la fonction `raster::crop()`, puis masquée à l'aide de la fonction `raster::mask()` pour ne conserver que les pixels qui sont strictement à l'intérieur des limites de l'AD. Le nombre de pixels dans les classes Végétal bas et Végétal haut (i.e., valeurs 3 et 4) a ensuite été compté en utilisant la fonction `base::sum()`. La superficie totale de la végétation a été extrapolée à partir du nombre de pixels sélectionnés en fonction de la résolution matricielle (i.e., 1m). Le pourcentage de couvert végétal pour chaque AD a ensuite été estimé en divisant la superficie totale de végétation par la superficie totale de l'AD, qui a été calculée en utilisant la fonction `sf::st_area()`.

VARIABLE 2 – SCORE DE MARGINALISATION PAR AIRE DE DIFFUSION : QUÉBEC (VARIABLE INDÉPENDANTE)

Les données d'entrée de la variable indépendante de cette étude proviennent de l'Indice canadien de défavorisation multiple de 2021, pour lequel un score de marginalisation global a été généré en faisant la moyenne des valeurs de chacune des quatre

TABLEAU 1. DONNÉES SPATIALES UTILISÉES.

DONNÉES	FORMAT ¹	ANNÉE ²	SOURCE ³
Limites administratives 1/20000	Classes d'entités vectorielles (*.SHP)	2024	Données Québec (MRNF, 2024)
Aire de diffusion (AD)	Classes d'entités vectorielles (*.SHP)	2021	Statistique Canada (Statistics Canada, 2021a)
L'Indice canadien de défavorisation multiple (QC)	Données tabulaires (*.XLSX)	2021	Statistique Canada (Statistics Canada, 2021b)
Indice canopée métropolitain	Surface matricielle (*.TIF)	2021	Observatoire Grand Montréal (CMM, 2021)
Utilisation du sol métropolitain	Classes d'entités vectorielles (*.SHP)	2022	Observatoire Grand Montréal (CMM, 2022a)

¹ SHP : Shapefile, TIF : Format TIFF (Tagged Image File Format), XLSX : Feuille de calcul au format Microsoft Office Open XML. ² L'année indiquée correspond à l'acquisition des données et non à leur publication. ³ Les liens de téléchargement des ensembles de données sont accessibles en cliquant sur la référence dans la colonne « Source ».

dimensions de la défavorisation multiple (i.e., instabilité résidentielle, composition ethnoculturelle, dépendance économique et vulnérabilité situationnelle) pour les AD au Québec (Statistics Canada, 2021b). Par conséquent, le score de marginalisation est classé de 1 à 5, où un score de 5 indique une marginalisation complète et 1 indique une marginalisation très faible ou nulle (Statistics Canada, 2021b).

ANALYSE APPROFONDIE

Ce projet consistait en grande partie à déterminer quel type d'analyse spatiale convenait le mieux à cette étude de cas. Intégrer la répartition des inégalités environnementales dans un modèle spatial présente son lot de défis, notamment quand il est question de trouver la manière la plus exacte de quantifier les relations dans la zone d'étude. Dans le but d'identifier un modèle parcimonieux des relations pour la zone d'étude, plusieurs analyses parallèles ont été effectuées sur les données, incluant à la fois des approches de régression linéaire (i.e., moindres carrés ordinaires et la régression pondérée géographiquement) et des analyses d'agrégats spatiaux (i.e., Getis-Ord local GI* et Local bivariate Moran's I).

Chaque étape de l'analyse a été effectuée deux fois : une fois en utilisant les limites de Laval de manière isolée et une deuxième fois dans le contexte de la CMM. Tout d'abord, les observations avec des valeurs manquantes, que ce soit pour le score de marginalisation global ou le pourcentage de la végétation totale, ont été supprimées à l'aide de la fonction `base::filter()` pour garantir que l'analyse porte sur un ensemble de données complet et sans valeurs spatiales aberrantes.

Le modèle de régression des moindres carrés ordinaires (OLS pour *Ordinary least squares* en anglais) a été ajusté à l'aide de la fonction `stats::lm()`. Le résumé du modèle a été généré à l'aide de la fonction `base::summary()` pour évaluer les coefficients de régression, la valeur du R^2 et la signification statistique des variables explicatives. Les résidus standardisés ont été calculés à l'aide de la fonction `stats::rstandard()` et ajoutés à l'objet spatial à des fins de cartographie.

Le modèle de régression pondérée géographiquement (GWR pour *Geographically Weighted Regression* en anglais) a été ajusté à l'aide de la fonction `spgwr::gwr()`. Le modèle a été calculé avec une bande passante déterminée préalablement à l'aide de la fonction `spgwr::gwr.sel()` et avec une fonction de pondération gaussienne (`gweight = gwr.Gauss`). Les résidus du

modèle GWR ont été extraits de la sortie du modèle, puis l'écart-type des résidus a été calculé en utilisant la fonction `stats::sd()`. Les résidus standardisés ont ensuite été calculés en divisant chaque résidu par l'écart-type, puis ajoutés à l'objet spatial à des fins de cartographie.

Pour l'analyse des agrégats spatiaux, la fonction `spdep::poly2nb()` a été utilisée pour construire une matrice de poids spatiaux (i.e., « qu'est-ce qu'un voisin ») basée sur la contiguïté de type reine (queen = TRUE). La contiguïté de type reine est également connue sous le nom de contiguïté « arêtes et sommets », où toute entité touchant une arête ou un sommet d'une observation est considérée comme voisine. Le nombre de voisins pour chaque région a été compté en utilisant la fonction `spdep::card()`, et les AD qui ne respectaient pas la condition de contiguïté ont été supprimées de la liste. La liste des voisins a été convertie en objet de poids spatiaux à l'aide de la fonction `spdep::nb2listw()`, avec une approche de normalisation standardisée par ligne (style = "W").

La statistique Getis-Ord locale Gi* a été calculée pour chaque AD en utilisant la fonction `spdep::localG()` avec l'objet de poids spatiaux généré précédemment. Les scores z standardisés ont été classés en trois catégories selon un seuil de confiance de 95 % (i.e., Point froid [-Inf, -1,96], Non significative [-1,96, 1,96] et Point chaud [1,96, Inf]) à l'aide de la fonction `base::cut()`, et les catégories résultantes ont été ajoutées à l'objet spatial à des fins de cartographie.

L'indice local I de Moran bivarié a été calculé à l'aide de la fonction `spdep::localmoran_bv()` en utilisant le même objet de poids spatiaux généré précédemment et avec 499 simulations à exécuter (`nsim = 499`). La fonction `spdep::hotspot()` a ensuite été appliquée au résultat pour les classer en agrégats d'association spatiale, en utilisant un seuil de signification de 0,05. La classification en catégories « High-High », « Low-Low », « High-Low » et « Low-High » suit la logique de PySAL (`quadrant.type = "pysal"`). Le vecteur factoriel résultant a été ajouté à l'objet spatial à des fins de cartographie.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES SUR LA DISTRIBUTION SPATIALE DES VARIABLES

Avant de procéder à d'autres analyses sur les données spatiales, il était essentiel d'examiner individuellement la distribution spatiale du couvert végétal et du score de marginalisation. La **Figure 1** et la **Figure 2** illustrent la répartition des deux variables à l'échelle de la CMM, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.

À travers la CMM, la végétation suivait un patron concentrique clair rayonnant depuis le noyau urbain (**Figure 1**). Aux marges extérieures de la CMM et sur la bordure nord de la péninsule lavalloise, le pourcentage de couvert végétal était très élevé, puis devenait de plus en plus clairsemé en se rapprochant des centres-villes. Ce patron est prévisible, car plus un secteur est intensément développé, plus il devient difficile d'intégrer des espaces verts au paysage (Pham et al., 2012). Une tendance similaire se manifeste lorsqu'on évalue la répartition des scores de marginalisation dans la zone d'étude. Les personnes vivant en bordure de la CMM, de même que dans la pointe ouest et sur la frontière nord de Laval, tendaient à avoir les scores

de marginalisation les moins élevés. En revanche, les scores de marginalisation tendaient vers des valeurs élevées dans les centres-villes et dans les endroits les plus densément peuplés de la péninsule (**Figure S2**).

RÉGRESSION DES MOINDRES CARRÉS ORDINAIRES (OLS)

Une régression OLS est souvent employée comme étape de traitement préliminaire en analyse spatiale pour déterminer s'il existe une relation entre deux variables avant d'effectuer des analyses spatiales plus poussées. La régression OLS évalue dans quelle mesure la variation de la variable dépendante (i.e., le pourcentage de végétation totale) peut être expliquée par la variable indépendante (i.e., le score de marginalisation) et détermine si cette relation est statistiquement significative. La régression OLS effectuée pour Laval et pour la CMM, dans le but d'étudier la relation entre le couvert végétal total et le score de marginalisation, a satisfait à toutes les hypothèses requises pour assurer l'exactitude de l'analyse.

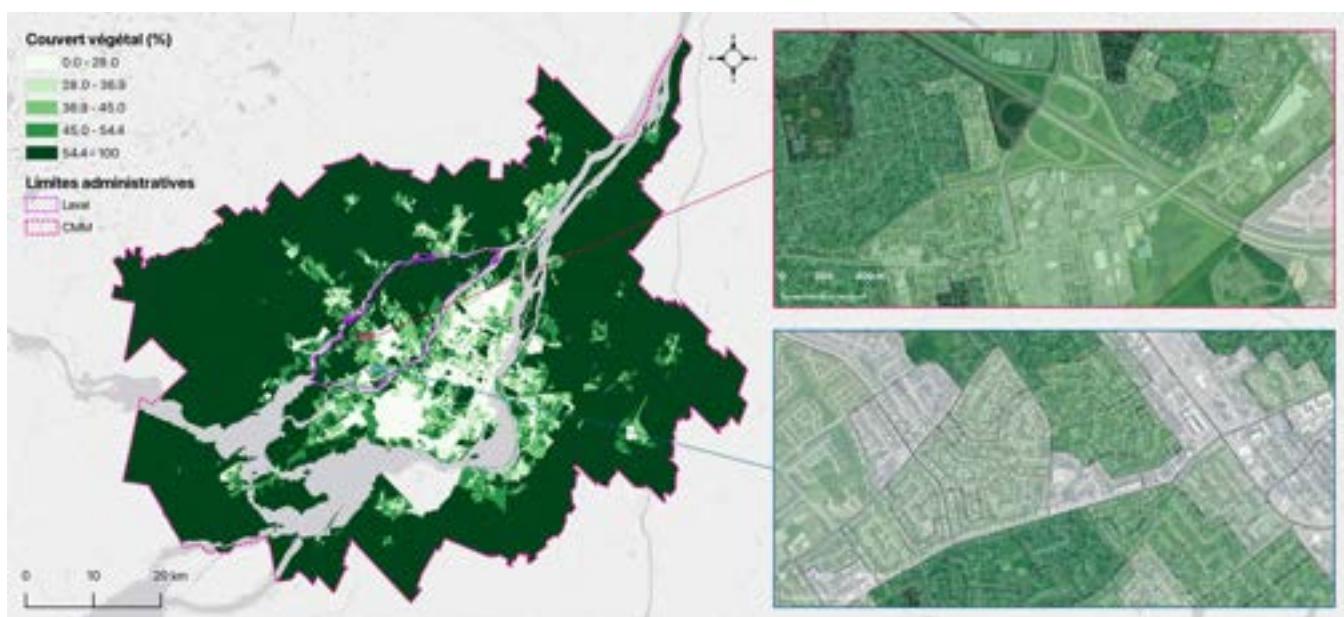


Figure 1. Couvert végétal à travers la CMM, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.

Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant de l'Indice canopée métropolitain (CMM, 2021); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

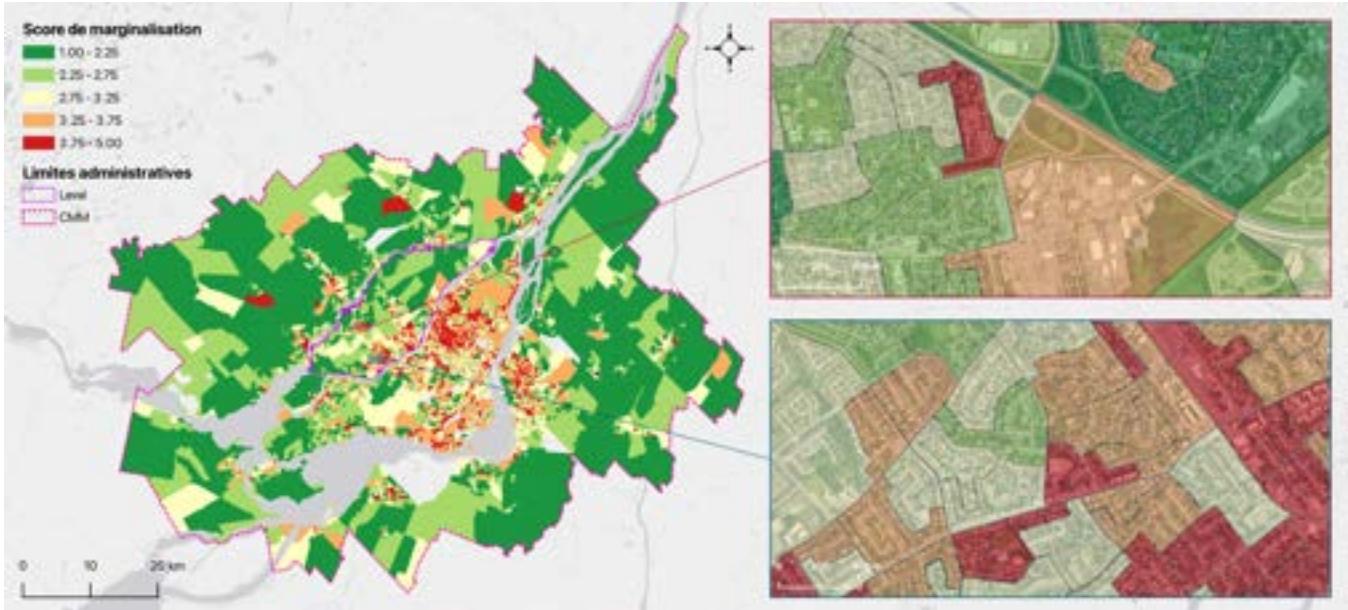


Figure 2. Score de marginalisation à travers la CMM, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.

Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données tirées de l'Indice canadien de défavorisation multiple (Statistics Canada, 2021b); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

La valeur du R^2 était de 0,11 dans le contexte local, ce qui indique que seulement 11 % de la variation du couvert végétal peut être expliquée par le score de marginalisation. Bien que cela suggère une relation faible, les résultats demeuraient statistiquement significatifs ($p \leq 0,001$), indiquant qu'il est peu probable que la relation observée soit le fruit du hasard. De plus, l'histogramme des résidus standardisés se rapproche d'une distribution normale (données non présentées), ce qui valide l'hypothèse de normalité. Le diagramme de dispersion des résidus montre également un patron aléatoire à distribution uniforme (données non présentées); aucun problème apparent d'hétéroscédasticité ou de non-linéarité n'a donc été observé. La même analyse a été effectuée à l'échelle de la CMM pour examiner les variations potentielles des variables. Les résultats demeuraient très similaires et statistiquement significatifs ($p \leq 0,001$). Cependant, une différence notable est la valeur du R^2 plus élevée dans ce modèle par rapport à celui limité à Laval. Dans ce cas, l'ajout d'un contexte élargi au modèle a renforcé la relation, faisant passer la valeur à 0,25.

L'analyse a révélé une non-stationnarité spatiale claire entre les variables. Comme l'illustre la **Figure 3**, une zone distincte de résidus surestimés est visible le long de la bordure nord, avec des agrégats particulièrement importants dans le nord-est et le nord-ouest. De même, de grands agrégats de valeurs systématiquement sous-estimées apparaissent dans

le centre de Laval. Cette tendance à l'agrégation des résidus (i.e., représentative de surestimations et de sous-estimations marquées) suggère que la relation entre les variables pourrait varier géographiquement au sein de la zone d'étude. Les tendances observées dans l'analyse isolée de Laval persistent dans cette analyse élargie, avec une non-stationnarité spatiale évidente à travers toute la péninsule, suivant des patrons similaires. Bien que la régression OLS fournisse des données utiles sur la relation globale entre les variables, son incapacité à tenir compte de la non-stationnarité spatiale révèle une limite importante. Ces résultats suggèrent que des méthodes plus spatialement adaptées pourraient mieux convenir à cette étude de cas.

ANALYSE DE POINTS CHAUDS (GETIS-ORD LOCAL GI*)

Dans le but de confirmer le potentiel de non-stationnarité spatiale, une analyse de points chauds (Getis-Ord local GI*) a été effectuée pour identifier des agrégats de valeurs aberrantes par rapport au patron spatial prévu dans les zones d'étude. Ce test compare la moyenne du voisinage d'une observation à la moyenne globale. Si la moyenne du voisinage diffère de $\pm 1,96$ écarts-types de la moyenne, il s'agit alors d'un point chaud ($\geq +1,96$) ou d'un point froid ($\leq -1,96$). Il est important de noter qu'une observation signalée comme faisant partie d'un point chaud n'est



Figure 3. Résidus standardisés résultant d'une régression OLS.

Contexte local (à gauche) et contexte de la CMM (à droite). Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant de l'Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

pas forcément une valeur aberrante en soi, mais son voisinage local l'est. Les grands agrégats de points chauds et de points froids renforcent la conclusion selon laquelle il existe une non-stationnarité spatiale dans le processus étudié. De plus, ces agrégats semblent mettre en évidence des secteurs où des taux élevés de marginalisation (**Figure 4**) coïncident avec un faible couvert végétal (**Figure 5**). Ces agrégats constituent des zones prioritaires, particulièrement à Laval, où de tels patrons spatiaux pourraient nécessiter des recherches supplémentaires et des interventions ciblées.

Les résultats de l'analyse de points chauds concordent étroitement avec les observations préliminaires faites précédemment concernant la distribution spatiale du couvert végétal total et du score de marginalisation à travers la CMM. Comme l'indiquaient les résultats initiaux, la bordure nord de Laval présente un pourcentage élevé de couvert végétal, celui-ci diminuant progressivement à mesure que l'on s'approche du centre-ville. De même, l'analyse des scores de marginalisation a révélé des niveaux de marginalisation plus bas dans les secteurs ouest et nord de Laval; les niveaux de marginalisation sont plus élevés dans les secteurs plus densément peuplés de la ville (**Figure S2**).

RÉGRESSION PONDÉRÉE GÉOGRAPHIQUEMENT (GWR)

Lorsqu'une non-stationnarité spatiale est détectée dans les résultats de la régression OLS, une régression pondérée géographiquement (GWR) est souvent utilisée comme alternative. La régression OLS est un modèle global (une seule fonction pour l'ensemble des données), tandis que la GWR exécute un modèle de régression pour chaque observation, en se basant sur un sous-ensemble local de voisins. Cette approche locale permet de saisir la variation de la force de la relation entre les variables à mesure que la fenêtre de recherche se déplace d'observation en observation dans la zone d'étude.

Une régression GWR subséquente a été appliquée aux zones d'étude pour tenir compte de la non-stationnarité spatiale observée dans les résultats des modèles OLS. L'amélioration de la valeur du R^2 (0,48) dans le contexte local suggère qu'il existe effectivement une non-stationnarité spatiale significative dans le processus, faisant passer la force de la relation de faible à modérée. Sur la carte de Laval, bien qu'il y ait toujours de grands agrégats de valeurs surestimées et sous-estimées, ceux-ci sont moins extrêmes que dans le modèle OLS (**Figure 6**). Un résultat similaire est observé en élargissant l'échelle d'analyse géographique de Laval à l'ensemble de la CMM. La valeur du R^2 pour cette étendue élargie est

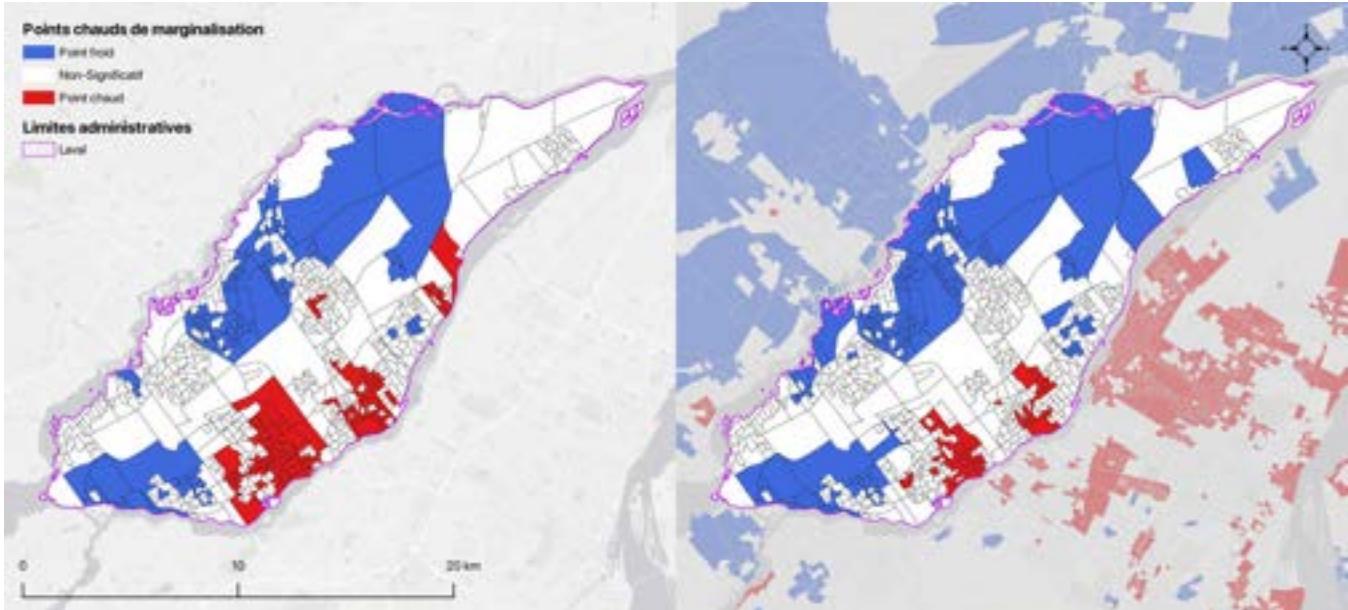


Figure 4. Points chauds et points froids du score de marginalisation à Laval.

Analyse de points chauds dans le contexte local (à gauche) et dans le contexte de la CMM (à droite). Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant des Limites administratives(MRNF, 2024) ; Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

légèrement supérieure à celle du modèle limité à Laval, atteignant 0,68, ce qui demeure dans la plage de la force de relation modérée. Cela indique que l'intégration du contexte élargi de la CMM améliore la précision de l'estimation de la relation, renforçant l'idée que les dépendances spatiales à une échelle élargie apportent un contexte précieux pour comprendre les patrons locaux.

La GWR est parfois considérée comme controversée, car elle exagère l'ajustement du modèle, ce que certaines personnes décrivent comme un surajustement « overfitting ». Toutefois, dans le contexte de données spatiales, où les variables sont intrinsèquement liées à leur localisation géographique, cette hypothèse est non seulement attendue, mais nécessaire pour une modélisation précise. Les résultats de l'OLS ont en outre confirmé que l'application de la GWR constituait la prochaine étape logique de l'analyse. La comparaison de l'indice global I de Moran pour les résidus standardisés des modèles OLS et GWR fournit un outil diagnostique utile pour évaluer dans quelle mesure chaque modèle tient compte de la dépendance spatiale. Bien que les résidus des deux modèles présentent toujours une autocorrélation spatiale statistiquement significative ($p \leq 0,05$), le passage de l'OLS à la GWR a réduit considérablement le degré d'autocorrélation dans les deux contextes. Plus précisément, l'indice I de Moran est passé de 0,352 à 0,072 dans le contexte local de Laval et de

0,506 à 0,172 dans le contexte élargi de la CMM. Ces résultats suggèrent que la GWR saisit mieux la structure spatiale sous-jacente des données et mène à une spécification plus adéquate du modèle.

INDICE LOCAL I DE MORAN BIVARIÉ

Alors que le test Getis-Ord Local Gi* compare la moyenne du voisinage local à la moyenne globale, l'indice local I de Moran d'Anselin évalue à la fois la moyenne du voisinage par rapport à la moyenne locale et l'observation individuelle par rapport à la moyenne de son voisinage local. Par conséquent, davantage de types de relations sont possibles, car une observation peut être significativement élevée et située dans un voisinage dont la moyenne est significativement supérieure à la moyenne globale, ce qui correspond à une classification « High-High ». À l'inverse, une observation peut être significativement basse, mais située dans un voisinage dont la moyenne est significativement supérieure à la moyenne globale, ce qui correspond à une classification « Low-High ».

La version bivariée de l'indice I de Moran étend la portée de l'analyse pour considérer deux variables spatialement coïncidentes ou deux attributs des mêmes éléments. Cette approche est particulièrement utile lorsque les variables coïncidentes n'entretiennent pas de relation linéaire forte, mais forment des agrégats spatiaux, comme cela semble être le cas

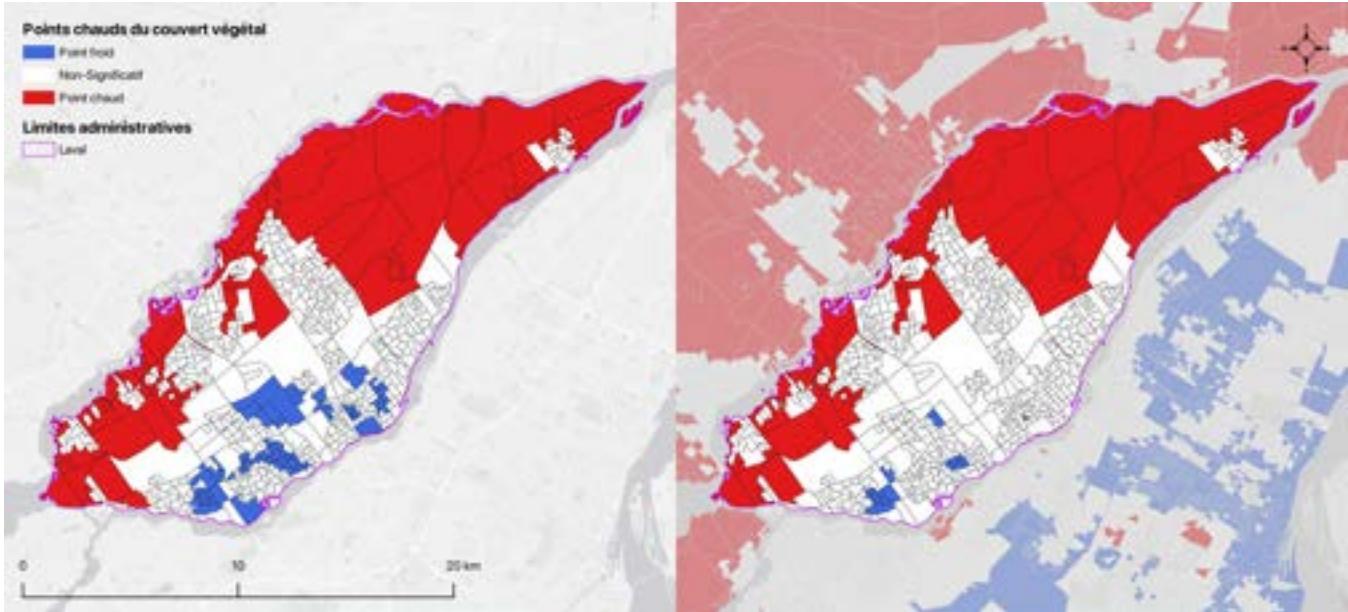


Figure 5. Points chauds et points froids du couvert végétal total à Laval.

Analyse de points chauds dans le contexte local (à gauche) et dans le contexte de la CMM (à droite). Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant des Limites administratives(MRNF, 2024); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.



Figure 6. Résidus standardisés résultant d'une GWR.

Contexte local (à gauche) et contexte de la CMM (à droite). Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant de l'Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

dans la présente étude. Au lieu de comparer la valeur d'une observation à la moyenne de son voisinage local et cette dernière à la moyenne globale pour une seule variable, la version bivariée compare la valeur d'une observation pour la variable indépendante (i.e., le score de marginalisation) à la moyenne du voisinage local pour la variable dépendante (i.e., le couvert végétal). Ainsi, un résultat « High-Low » indiquerait une aire de diffusion avec un score de marginalisation significativement élevé au sein d'un voisinage local présentant un couvert végétal significativement bas. À l'inverse, un résultat « Low-High » significatif révélerait une aire de diffusion avec un score de marginalisation bas, situé dans un voisinage local où le couvert végétal moyen est élevé. L'analyse bivariée basée sur l'indice local I de Moran s'est avérée la méthode la plus utile pour cette étude parce qu'elle permettait de résoudre les relations non linéaires entre les variables spatialement coïncidentes. Les résultats de l'analyse de l'indice local I de Moran bivarié sont présentés à la **Figure 7**.

Bien qu'une vaste superficie de Laval ait été classée comme « Non significative » dans le contexte local, les résultats des deux contextes (i.e., le contexte local basé uniquement sur les données de Laval et le contexte élargi basé sur l'ensemble de données de la CMM) révèlent des tendances similaires (**Figure 7**). Tel qu'attendu, très peu de régions forment des agrégats pouvant être classés « High-High » et « Low-Low » dans les deux contextes. Ceci suggère que

les secteurs avec un score global de marginalisation élevé sont moins susceptibles d'être associés à une verdure abondante. À l'autre extrême, il semble rare que la verdure soit insuffisante dans les quartiers peu marginalisés. Cette tendance est conforme aux conclusions de diverses études, qui indiquent que les quartiers plus aisés et moins marginalisés bénéficient d'un couvert végétal accru et d'un meilleur accès aux espaces verts (Pham et al., 2012).

Dans les deux contextes, une large bande d'aires de diffusion classées « Low-High » a été observée le long de la frontière nord de Laval. La plupart de ces AD sont parmi les moins densément peuplées de Laval (**Figure S2**) et sont situées dans le périmètre agricole (Ville de Laval, 2017). Inversement, de nombreuses AD classées « High-Low » étaient regroupées près du centre-ville (Ville de Laval, 2024), et faisaient partie des AD les plus densément peuplées (**Figure S2**). Ces patrons se rapprochent étroitement des résultats de l'analyse de points chauds et des observations préliminaires, qui suggèrent que les secteurs fortement marginalisés tendent à être plus concentrés dans les centres urbains avec peu de végétation, tandis que les secteurs peu marginalisés sont couramment associés à un couvert végétal plus abondant. Une telle répartition n'est pas surprenante, car il est courant que les personnes les plus marginalisées vivent au centre des villes, où l'accès aux transports en commun et autres services est meilleur, et où les logements sont plus petits, compacts et abordables (Pham et al., 2012).

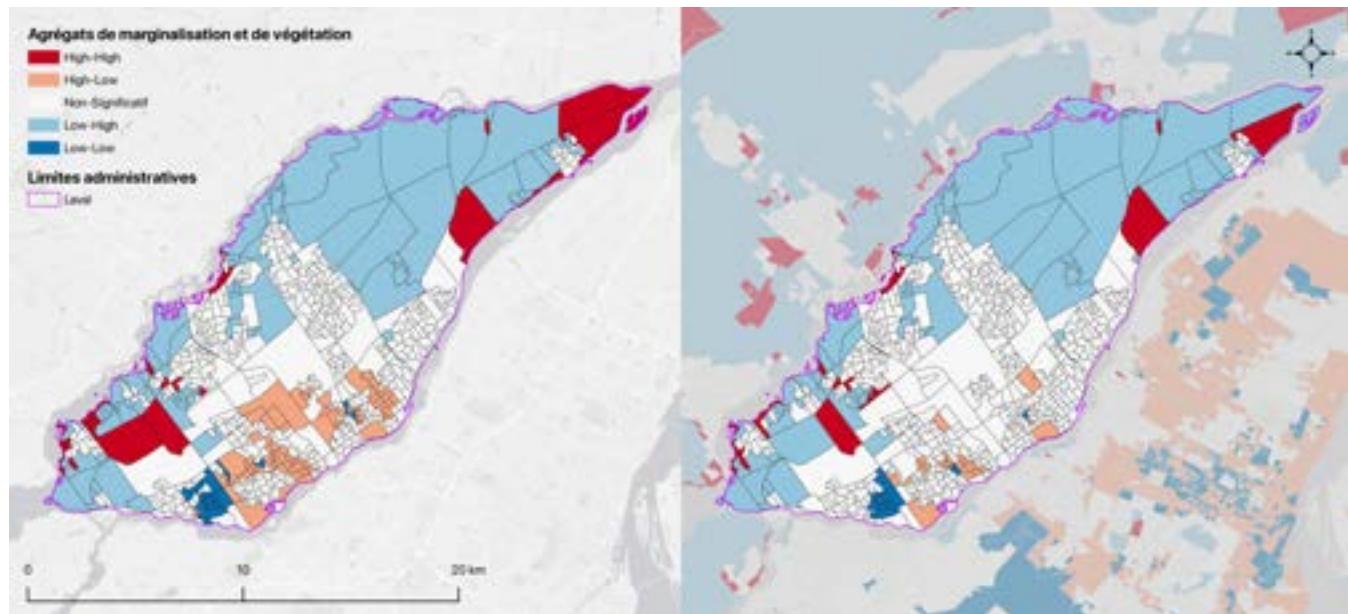


Figure 7. Carte des agrégats spatiaux à Laval, identifiés selon l'indice local I de Moran bivarié.

Contexte local (à gauche) et contexte de la CMM (à droite). Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant des Limites administratives (MRNF, 2024); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

Les résultats des analyses de l'indice local I de Moran bivarié fournissent des informations précieuses sur les relations spatiales entre les scores globaux de marginalisation et le pourcentage de couvert végétal total. Ces données permettent de définir des zones d'intervention prioritaires pour réduire les inégalités écologiques. Il importe de préciser que corriger ces inégalités ne nécessitera pas de réduire le couvert végétal dans les quartiers peu marginalisés. Les efforts doivent plutôt viser à accroître les infrastructures végétalisées dans les secteurs fortement marginalisés, de même qu'à conserver ou à gérer les espaces verts existants, pour ainsi favoriser un accès équitable à leurs bienfaits. L'étude de chaque aire de diffusion présentant un résultat « High-Low » significatif dans les deux contextes aide à identifier les occasions de mettre en place de nouvelles infrastructures végétalisées ou de conserver et gérer celles qui existent déjà.

PROFIL GÉNÉRAL DES AGRÉGATS « HIGH-LOW »

La superficie totale des AD présentant un résultat « High-Low » significatif est de 17,82 km² dans le contexte local et de 5,07 km² dans le contexte de la CMM. La superposition de ces AD significatives avec l'Indice canopée métropolitain (CMM, 2021) et les données de l'utilisation du sol métropolitain (CMM,

2022a) révèle des patrons hétérogènes (**Tableau 2** et **Tableau 3**), mettant en lumière de nombreuses occasions pour les décisionnaires de promouvoir une répartition équitable de la végétation à Laval (**Figure 8** et **Figure 9**). Selon l'Indice canopée métropolitain, la prédominance des surfaces imperméables au sein des agrégats « High-Low » significatifs est évidente; ces surfaces couvrent en moyenne 63,99 % de la surface des agrégats dans le contexte local et 53,11 % dans le contexte de la CMM (**Tableau 2** et **Tableau 3**).

Si l'on considère les données sur l'utilisation des sols, la superficie globale des agrégats « High-Low » significatifs est principalement occupée par des terrains à vocation résidentielle, qui couvrent en moyenne 30,51 % de la superficie des agrégats dans le contexte local et 26,34 % dans le contexte de la CMM. Les terrains vacants représentent 9,62 % de la superficie des agrégats dans le contexte local, tandis que ce pourcentage passe à 21,07 % dans le contexte de la CMM. Parmi les autres utilisations importantes du sol, figurent les espaces publics (24,77 % et 20,23 %), les terrains institutionnels (11,77 % et 13,58 %) et les espaces commerciaux (19,49 % et 10,69 %), respectivement dans le contexte local et dans celui de la CMM, comme le montrent le **Tableau 2** et le **Tableau 3**.

TABLEAU 2. TYPE D'UTILISATION DU SOL ET COUVERTURE DE LA CANOPÉE DANS LES AGRÉGATS « HIGH-LOW » À TRAVERS LAVAL, DANS UN CONTEXTE LOCAL.

TYPE D'UTILISATION DU SOL	MIN. BAS	MIN. HAUT	VÉGÉTAL HAUT	VÉGÉTAL BAS	AQUATIQUE	TOTAL
Agricole	7 792 (0,04 %)	965 (0,01 %)	43 926 (0,25 %)	10 227 (0,06 %)	0 (0,00 %)	62 910 (0,35 %)
Commerciale	2 208 961 (12,40)	785 664 (4,41 %)	315 920 (1,77 %)	120 338 (0,68 %)	41 318 (0,23 %)	3 472 201 (19,49 %)
Hydrographie	1 931 (0,01 %)	4 038 (0,02 %)	981 (0,01 %)	10 760 (0,06 %)	929 (0,01 %)	18 639 (0,10 %)
Industrielle	154 547 (0,87 %)	84 735 (0,48 %)	29 982 (0,17 %)	7 151 (0,04 %)	0 (0,00 %)	276 415 (1,55 %)
Institutionnelle	860 780 (4,83 %)	293 532 (1,65 %)	620 716 (3,48 %)	321 876 (1,81 %)	151 (0,00 %)	2 097 055 (11,77 %)
Parcs et loisirs	38 644 (0,22 %)	2 140 (0,01 %)	160 759 (0,90 %)	122 674 (0,69 %)	2 430 (0,01 %)	326 647 (1,83 %)
Publique	3 165 611 (17,77)	84 662 (0,48 %)	893 981 (5,02 %)	268 278 (1,51 %)	257 (0,00 %)	4 412 789 (24,77 %)
Résidentielle	1 836 112 (10,31)	1 536 589 (8,62 %)	1 366 446 (7,67 %)	696 255 (3,91 %)	349 (0,00 %)	5 435 751 (30,51 %)
Vacant	299 757 (1,68 %)	35 148 (0,20 %)	673 499 (3,78 %)	698 879 (3,92 %)	7 483 (0,04 %)	1 714 766 (9,62 %)
Total	8 574 135 (48,12 %)	2 827 473 (15,87 %)	4 106 210 (23,05 %)	2 256 438 (12,66 %)	52 917 (0,30 %)	17 817 173 (100,00 %)

Les valeurs dans chaque cellule indiquent la superficie (en m²) de chaque type d'utilisation du sol par groupe de couverture de la canopée (c.-à-d. Type d'utilisation du sol par couverture de la canopée), et les valeurs entre parenthèses présentent leurs pourcentages respectifs (%) dans toutes les AD « High-Low » significatives.

TABLEAU 3. TYPE D'UTILISATION DU SOL ET COUVERTURE DE LA CANOPÉE DANS LES AGRÉGATS «HIGH-LOW» À TRAVERS LAVAL, DANS LE CONTEXTE DE LA CMM.

TYPE D'UTILISATION DU SOL	MIN. BAS	MIN. HAUT	VÉGÉTAL BAS	VÉGÉTAL HAUT	AQUATIQUE	TOTAL
Agricole	7 792 (0,15 %)	965 (0,02 %)	43 926 (0,87 %)	10 227 (0,20 %)	0 (0,00 %)	62 910 (1,24 %)
Commerciale	351 594 (6,94 %)	128 806 (2,54 %)	39 949 (0,79 %)	21 127 (0,42 %)	0 (0,00 %)	541 476 (10,69 %)
Hydrographie	128 (0,00 %)	431 (0,01 %)	158 (0,00 %)	1 859 (0,04 %)	350 (0,01 %)	2 926 (0,06 %)
Industrielle	54 098 (1,07 %)	40 079 (0,79 %)	9 847 (0,19 %)	3 768 (0,07 %)	0 (0,00 %)	107 792 (2,13 %)
Institutionnelle	270 512 (5,34 %)	95 889 (1,89 %)	196 974 (3,89 %)	124 538 (2,46 %)	0 (0,00 %)	687 913 (13,58 %)
Parcs et loisirs	20 404 (0,40 %)	1 417 (0,03 %)	108 171 (2.13%)	105 019 (2.07%)	1 628 (0,03 %)	236 639 (4,67 %)
Publique	727 244 (14,35 %)	13 792 (0,27 %)	198 615 (3,92 %)	85 483 (1.69%)	133 (0,00 %)	1 025 267 (20,23 %)
Résidentielle	417 317 (8,24 %)	411 836 (8,13 %)	311 671 (6,15 %)	193 812 (3,82 %)	126 (0,00 %)	1 334 762 (26,34 %)
Vacant	131 125 (2,59 %)	17 893 (0,35 %)	412 214 (8,13 %)	498 956 (9,85 %)	7 483 (0,15 %)	1 067 671 (21,07 %)
Total	1 980 214 (39,08 %)	711 108 (14,03 %)	1 321 525 (26,08 %)	1 044 789 (20,62 %)	9 720 (0,19 %)	5 067 356 (100,00 %)

Les valeurs dans chaque cellule indiquent la superficie (en m²) de chaque type d'utilisation du sol par groupe de couverture de la canopée (c.-à-d. Type d'utilisation du sol par couverture de la canopée), et les valeurs entre parenthèses présentent leurs pourcentages respectifs (%) dans toutes les AD «High-Low» significatives.

MISE EN PLACE DE NOUVELLES INFRASTRUCTURES VÉGÉTALISÉES

Les résultats montrent que la majorité des aires de diffusion « High-Low » significatives identifiées sont principalement occupées par des terrains à vocation résidentielle, commerciale et institutionnelle, qui sont séparés par des espaces publics principalement dédiés aux voies de circulation. Ces quatre types d'utilisation du sol présentent les plus hauts taux de minéralisation basse (**Tableau 2** et **Tableau 3**). Ils constituent donc des cibles prometteuses pour mettre en place de nouvelles infrastructures végétalisées grâce à des opérations de déminéralisation. De nombreux projets inspirants réalisés sur des terrains municipaux démontrent qu'il est possible d'augmenter le couvert végétal dans les secteurs résidentiels. Cela peut notamment se faire en réduisant la largeur des rues afin d'accueillir des infrastructures phytotechnologiques, comme des aires de biorétention, des noues végétalisés, des fosses d'arbres perméables et des avancées de trottoirs végétalisées (Fortin Faubert et al., 2023). Le rétrécissement de la largeur des rues améliore également la sécurité des quartiers en réduisant la vitesse de circulation. Dans les secteurs commerciaux et institutionnels, il est indéniable que les stationnements et les cours d'école asphaltées présentent de nombreuses occasions de mettre

en place des aires de biorétention, de remplacer des espaces de stationnement asphaltés par des pavés végétalisés, de créer des espaces récréatifs gazonnés et de planter des arbres (Clément et Ouellet Jobin, 2024; Fortin Faubert et al., 2023). En plus d'accroître la végétation et d'améliorer le paysage, de telles interventions aident à atténuer les îlots de chaleur urbains et à soutenir la recharge des eaux souterraines grâce à une gestion efficace des eaux pluviales (St-Laurent et Petridis, 2019). Bien que les zones à forte minéralisation présentent de grands défis de transformation, la mise en place de toits verts demeure une solution viable et attrayante pour les bâtiments (Fortin Faubert et al., 2023).

CONSERVATION ET EXPANSION DES INFRASTRUCTURES VÉGÉTALISÉES EXISTANTES

Bien que les aires de diffusion « High-Low » significatives étaient, en moyenne, dominées par des surfaces imperméables, le couvert végétal total sur l'ensemble des agrégats était légèrement inférieur, atteignant en moyenne 35,71 % dans le contexte local et 46,70 % dans le contexte de la CMM (**Tableau 2** et **Tableau 3**). Dans la plupart de ces AD, le couvert végétal était principalement dispersé à travers le paysage résidentiel. Cependant, plusieurs autres AD comprenaient un ou plusieurs



Figure 8. Aires de diffusion « High-Low » significatives superposées à l'Indice canopée métropolitain.

Les étiquettes correspondent aux codes des AD du recensement de 2021. Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant de l'Indice canopée métropolitain (CMM, 2021); Limites administratives (MRNF, 2024); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

espaces verts très distincts à proximité de secteurs fortement urbanisés. Six de ces AD « High-Low » significatives (i.e., 24650371, 24650181, 24650155, 24650331, 24650646 et 24650162) étaient même majoritairement végétalisées et entourées de milieux minéralisés plus restreints (**Figure 8**). La présence d'espaces fortement végétalisés au sein des agrégats « High-Low » significatifs s'explique par le principe analytique de l'indice local I de Moran: ces zones ont été identifiées en raison de leur proximité avec des zones moins végétalisées. Ce contraste entre les zones végétalisées et les zones urbanisées qui les avoisinent souligne l'importance écologique de ces espaces verts. Ceux-ci peuvent en effet constituer des pôles ou corridors essentiels pour soutenir la biodiversité et fournir un large éventail de services écosystémiques.

En raison de leur rareté relative, les infrastructures végétalisées existantes au sein des agrégats « High-Low » significatifs jouent un rôle crucial; leur conservation et leur expansion sont donc d'une grande importance. Les AD 24650371, 24650646 et 24650162, qui sont majoritairement végétalisées, partagent un point commun : le principal type d'utilisation du sol des espaces verts est celui des « terrains vacants » (**Figure 9**). D'autres AD avec un couvert végétal global plus faible, comme 24650701, 24650649, 24650672, 24650647, 24650169 et 24650114, comprenaient également des terrains vacants très végétalisés. Identifiées comme nécessitant des interventions prioritaires, ces AD offrent aux décisionnaires l'occasion de transformer les terrains vacants végétalisés en parcs institutionnels ou en espaces

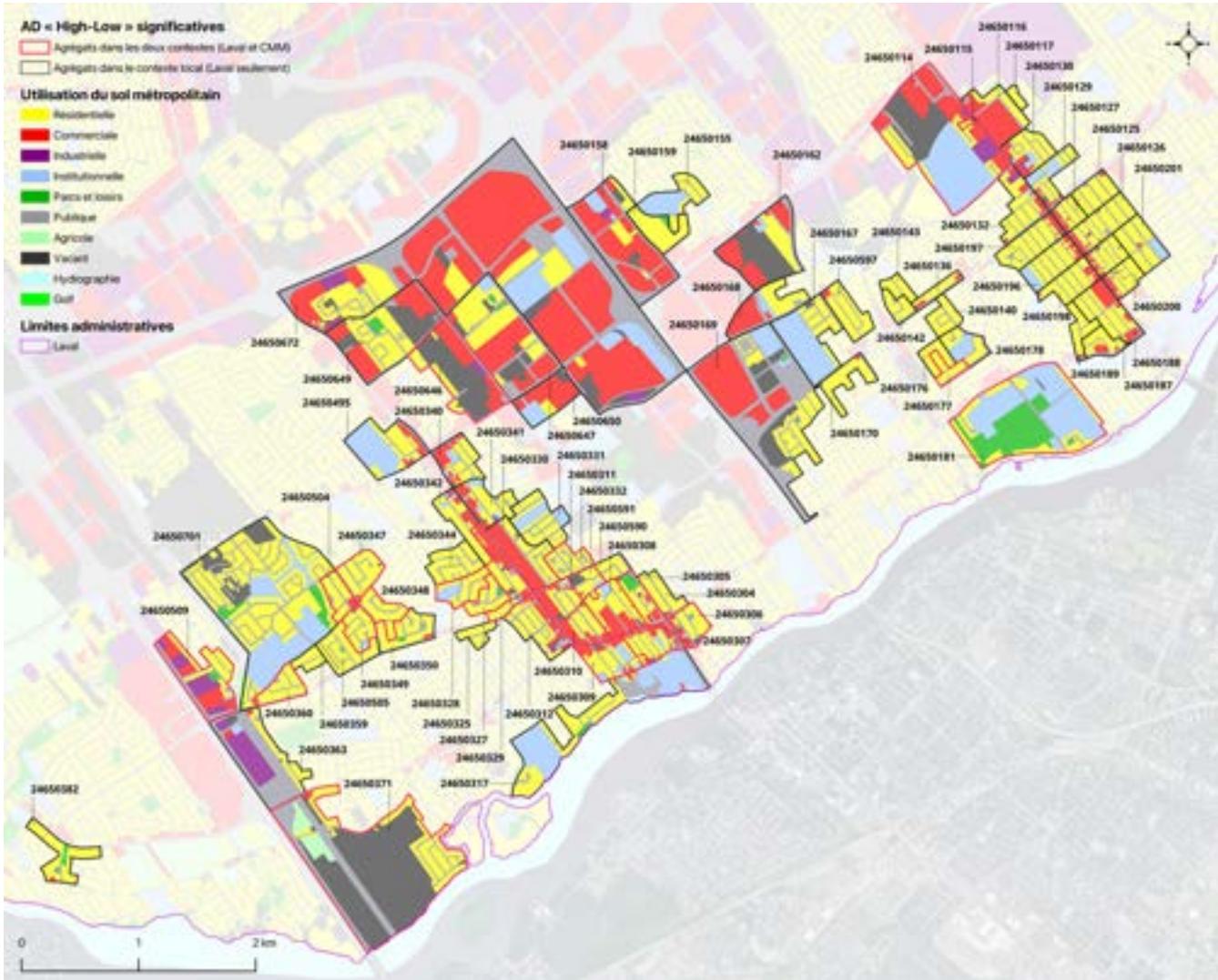


Figure 9. Aires de diffusion « High-Low » significatives superposées aux données de l'utilisation du sol métropolitain.

Les étiquettes correspondent aux codes des AD du recensement de 2021. Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Source : données sur l'utilisation du sol métropolitain (CMM, 2022a); Limites administratives (MRNF, 2024); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

verts publics, tout en améliorant leur accessibilité et en les intégrant à des réseaux urbains élargis. Ces efforts permettraient d'assurer une répartition durable et équitable des bienfaits écologiques et sociaux de ces espaces verts (Albro, 2019; Anderson et Minor, 2017).

Les terrains vacants sont souvent inclus dans les stratégies de développement économique municipal en raison de leur potentiel pour la production alimentaire locale, la création d'emplois, l'augmentation de la valeur des propriétés et l'attraction de nouvelles et nouveaux résident.e.s (Montréal, 2019; Pagano et Bowman, 2000). Toutefois, le réaménagement permanent de terrains vacants n'est pas toujours possible en raison de diverses contraintes, y compris des facteurs physiques (p. ex. taille, configuration,

emplacement ou pente), des facteurs naturels (p. ex. risque d'inondation, milieux humides et aires protégées) ou des facteurs techniques (p. ex. zonage ou contamination) (Pagano et Bowman, 2000). Dans de tels cas, il semble évident que la municipalité devrait envisager la gestion à long terme et la conservation de la végétation existante comme solution attrayante pour ces espaces sous-utilisés (Fortin Faubert et al., 2022). Une solution potentielle aux contraintes de zonage, qui a été envisagée dès le départ, est la conversion de plusieurs des anciens terrains de golf de Laval en parcs publics ou en espaces verts (Courrier Laval, 2024; Ducas, 2022). Une telle intervention aiderait grandement la CMM à atteindre son objectif de conserver 30 % du territoire métropolitain d'ici 2030 (CMM, 2022b). Toutefois, selon les résultats des

analyses de l'indice local I de Moran bivarié, il est clair que les aires entourant ces terrains de golf vacants ne sont pas celles nécessitant des interventions prioritaires pour favoriser l'équité.

Les terrains vacants et sous-utilisés représentent un défi majeur pour de nombreuses municipalités canadiennes. En effet, ceux-ci demeurent souvent à l'abandon pendant des décennies en raison de la contamination des sols (FCM, 2015). Malgré les besoins en assainissement, ces terrains offrent l'occasion unique d'intégrer des infrastructures végétalisées, qui fournissent une multitude de services écosystémiques favorisant la résilience et l'adaptativité du paysage urbain. La phytoremédiation et la phytogestion sont des solutions fondées sur la nature qui contribuent à l'assainissement des sols, tout en améliorant la gestion des risques (Fortin Faubert, Desjardins, et al., 2021; Fortin Faubert, Hijri, et al., 2021). En réduisant le ruissellement de surface, le couvert végétal minimise le lessivage des contaminants et le transfert de la pollution vers les eaux souterraines et les écosystèmes aquatiques adjacents. Malgré ce potentiel écologique, la conversion de terrains vacants contaminés en espaces verts publics demeure un processus complexe, qui nécessite souvent d'importants travaux d'assainissement. Néanmoins, des investissements stratégiques dans la gestion de ces espaces pourraient générer des bienfaits considérables à long terme, notamment en matière de durabilité environnementale, d'équité sociale et d'amélioration de la santé publique.

Plusieurs terrains institutionnels et parcs publics situés dans les aires de diffusion « High-Low » significatives contribuent déjà à la durabilité des espaces verts dans les quartiers marginalisés de Laval. Cependant, la tendance croissante à installer des aires de jeux à surfaces synthétiques, comme observé dans les AD 24650169, 24650167, 24650114, 24650201, 24650178 et 24650317, soulève des inquiétudes quant à leurs impacts environnementaux et écologiques à long terme (Barnes et Watkins, 2022; Ignatjeva et al., 2024). Bien que les surfaces synthétiques soient très durables et nécessitent peu d'entretien, elles ne fournissent pas de services écosystémiques essentiels, comme la séquestration du carbone, la purification de l'air et l'infiltration de l'eau. En outre, leurs propriétés d'absorption de chaleur exacerbent les îlots de chaleur urbains, en particulier dans les secteurs où la végétation naturelle est peu présente. Le remplacement des espaces verts naturels par des surfaces synthétiques réduit également la

disponibilité des habitats pour la biodiversité locale, ce qui fragmente davantage les écosystèmes (Monteiro, 2017). Par conséquent, il convient d'évaluer avec soin les avantages fonctionnels des surfaces synthétiques par rapport à leurs inconvénients environnementaux, en particulier dans les quartiers déjà confrontés à des pressions écologiques dues à un faible couvert végétal.

CONSIDÉRATIONS POUR LA PLANIFICATION D'INFRASTRUCTURES VÉGÉTALISÉES

Bien que la protection des milieux naturels, la végétalisation et la déminéralisation des milieux de vie fassent déjà partie des pratiques de Laval ou soient en voie d'intégration, le plan climatique de Laval le plus récent n'aborde pas les enjeux d'équité et de justice climatique (Ville de Laval, 2023). Selon les résultats de la présente étude, les décisionnaires de Laval devraient songer sérieusement à mettre en place de nouvelles infrastructures végétalisées ou à prioriser la conservation et l'expansion de celles qui existent déjà, en particulier dans les aires de diffusion « High-Low » significatives identifiées par l'analyse de l'indice local I de Moran bivarié. Ces efforts favoriseraient une répartition équitable de la végétation.

Si la municipalité décide de mettre en œuvre ces recommandations, en totalité ou en partie, elle devra prendre en compte certaines considérations afin d'assurer l'efficacité des projets en ce sens. Les impacts de l'urbanisation sur le couvert végétal ne se limitent pas aux milieux bâtis, mais incluent également le remplacement des paysages naturels par des espaces verts aménagés (Wu et al., 2023). Les résultats d'études précédentes indiquent que les résident.e.s retirent davantage de bienfaits des espaces verts urbains lorsque ceux-ci présentent un caractère naturel ou « sauvage » (Colley et al., 2016; Wu et al., 2023). Pour la suite des choses, il pourrait donc être avantageux de rendre les terrains vacants accessibles au public et de les nettoyer sans intervenir excessivement (Éco-pivot, 2024). Ce concept de « naturalité » est très facilement reconnaissable et différenciable par des personnes d'horizons divers. Il n'est pas difficile pour les gens d'identifier comme naturels les paysages qui comprennent des « composantes biotiques et hydrologiques (ou éléments verts/bleus) », ni de reconnaître que les bâtiments et les stationnements ne le sont pas (Colley et al., 2016). Cependant, les personnes consultées étaient également en mesure de distinguer le naturel « artificiel » de la vraie nature. Beaucoup ont d'ailleurs

rapporté une préférence pour l'aspect « sauvage » de la vraie nature, au lieu de « l'esthétique soignée et ordonnée dans les espaces ouverts » (Colley et al., 2016).

LIMITES DE L'ÉTUDE

Comme pour toute analyse spatiale, cette étude comporte des limites dont il faut tenir compte. Premièrement, l'utilisation de découpages statistiques (les AD dans ce cas) nécessite de considérer le problème d'unité d'aire modifiable (MAUP pour *Modifiable Areal Unit Problem* en anglais) ou effet « Openshaw », où les résultats des données agrégées dépendent fortement du système de zonage et de son échelle. Les résultats de cette analyse varieront si l'échelle passe des aires de diffusion à un plus vaste secteur de recensement. En particulier, il importe de considérer la problématique du zonage qui fait partie du MAUP. Les limites statistiques ne sont pas uniformes; elles sont conçues pour maintenir une taille de population relativement constante dans chaque zone, tout en étant définies sans tenir compte des caractéristiques naturelles. Le système de zonage conçu pour organiser la population peut subdiviser artificiellement des parcelles d'espaces verts qui s'étendent sur plusieurs zones. Une autre limite à considérer est le fait que cette étude se concentre uniquement sur le pourcentage de couvert végétal total au sein des AD. Par conséquent, elle ne tient pas compte du pourcentage de végétation haute ou basse, ni de l'accessibilité piétonnière aux espaces verts ou de la verdure en milieu de travail, qui ont tous une influence importante sur la santé mentale et le bien-être général de la population. Il serait nécessaire d'effectuer des recherches supplémentaires pour déterminer si ces variables individuelles sont équitablement réparties sur le territoire de Laval.

CONCLUSION

Cette étude met en évidence les inéquités environnementales dans la répartition du couvert végétal total à travers la Ville de Laval. Les résultats montrent une forte corrélation entre le couvert végétal total et les scores de marginalisation, ce qui met en lumière des inégalités environnementales importantes. Les quartiers les plus marginalisés, souvent situés près du centre-ville, ont un couvert végétal moindre, tandis que les secteurs moins marginalisés et moins densément peuplés, notamment dans le nord de Laval, bénéficient d'un couvert végétal plus abondant.

Il est crucial de reconnaître l'importance de l'équité environnementale dans la planification urbaine, de même que la nécessité d'adopter des stratégies ciblées pour améliorer la répartition de la végétation dans les quartiers marginalisés. Pour remédier à ces inégalités et améliorer l'équité environnementale, il est

essentiel de mettre en œuvre des interventions ciblées visant à accroître le couvert végétal dans les secteurs marginalisés. Ces efforts doivent inclure la mise en place de nouvelles infrastructures végétalisées ainsi que la conservation et l'expansion des infrastructures existantes. Cela peut se faire en priorisant des solutions fondées sur la nature, notamment via des phytotechnologies et des projets de déminéralisation. Les décisionnaires devraient également privilégier les espaces verts naturels au lieu des surfaces artificielles pour maximiser les bénéfices écologiques et sociaux. En adoptant ces recommandations, la Ville de Laval et la CMM progresseront vers une répartition plus équitable de la végétation, améliorant ainsi la résilience urbaine et le bien-être de la population entière.

BIBLIOGRAPHIE

- Albro, S. (2019). *Vacant to vibrant: Creating successful green infrastructure networks* (Island Press).
- Ambrey, C. L. (2016). An investigation into the synergistic wellbeing benefits of greenspace and physical activity: Moving beyond the mean. *Urban Forestry & Urban Greening*, 19, 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.06.020>
- Anderson, E. C. et Minor, E. S. (2017). Vacant lots: An underexplored resource for ecological and social benefits in cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 146-152. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.11.015>
- Barnes, M. R. et Watkins, E. (2022). Differences in likelihood of use between artificial and natural turfgrass lawns. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 37, 100480. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2021.100480>
- Clément, C. et Ouellet Jobin, V. (2024). *Déménérer avec sa communauté - Guide pratique pour l'implantation de stratégies de déminéralisation participative à l'échelle municipale*. https://souslespaves.ca/sites/default/files/upload/document/pages/Guidemunicipal_SLP_2024_0.pdf
- CMM. (2021). Données géoréférencées - Indice canopée Métropolitain [TIF]. https://observatoire.cmm.qc.ca/produits/donnees-georeferencees/#indice_canopee
- CMM. (2022a). Données géoréférencées - Utilisation du sol [SHP]. https://observatoire.cmm.qc.ca/produits/donnees-georeferencees/#indice_canopee
- CMM. (2022b). Protection des milieux naturels : la CMM s'engage à atteindre 30 % en 2030. <https://cmm.qc.ca/communiques/protection-des-milieux-naturels-la-cmm-sengage-a-atteindre-30-en-2030/>
- Colley, K., Brown, C. et Montarzino, A. (2016). Restorative wildscapes at work: an investigation of the wellbeing benefits of greenspace at urban fringe business sites using 'go-along' interviews. *Landscape Research*, 41(6), 598-615. <https://doi.org/10.1080/01426397.2016.1197191>
- Courrier Laval. (2024). Reconversion des terrains de golf : la CTGT décue du recul de la CMM. <https://courrierlaval.com/reconversion-des-terrains-de-golf-la-ctgt-decue-du-recule-de-la-cmm/>
- Ducas, I. (2022). Laval veut protéger 70% de la superficie de ses golfs. <https://www.lapresse.ca/actualites/2022-05-07/espaces-verts/laval-veut-proteger-70-de-la-superficie-des-golfs.php>
- Éco-pivot. (2024). *Bilan du bioblitz du 8, 9 juin 2024 au Champ des Possibles, à Montréal, rapport final*. https://champdespossibles.org/wp-content/uploads/2025/01/Rapport_bioblitz_CdesP_2024.pdf
- FCM. (2015). *Commencer à revitaliser vos sites contaminés : S'engager à agir*. Fédération canadienne des municipalités. <https://fcm.ca/sites/default/files/documents/resources/guide/commencer-a-revitaliser-vos-sites-contamines-engager-a-agir-fmv.pdf>
- Ferguson, M. (2019). Birth cohort environmental context: Socio-economic and ethnic inequalities in greenspace accessibility. *Environmental Epidemiology*, 119. <https://doi.org/10.1097/01.EE9.0000607036.90821.77>
- Fortin Faubert, M., Desjardins, D., Hijri, M. et Labrecque, M. (2021). Willows Used for Phytoremediation Increased Organic Contaminant Concentrations in Soil Surface. *Applied Sciences*, 11(7), 2979. <https://doi.org/10.3390/app11072979>
- Fortin Faubert, M., Hénault-Ethier, L. et Duchesne, S. (2023). *S'adapter au climat par le verdissement - Guide pour les municipalités*. Union des municipalités du Québec (UMQ). <https://umq.qc.ca/wp-content/uploads/2023/05/webumqguidereverdissement2023-7.pdf>
- Fortin Faubert, M., Hénault-Ethier, L. et Hallmich, C. (2022). *Adaptation aux changements climatiques et villes durables - Outil d'aide à*

- la décision pour le verdissement de terrains vacants potentiellement contaminés en milieux urbains.* Fondation David Suzuki.
- Fortin Faubert, M., Hijri, M. et Labrecque, M. (2021). Short Rotation Intensive Culture of Willow, Spent Mushroom Substrate and Ramial Chipped Wood for Bioremediation of a Contaminated Site Used for Land Farming Activities of a Former Petrochemical Plant. *Plants*, 10(3), 520. <https://doi.org/10.3390/plants10030520>
- Frumkin, H., Bratman, G. N., Breslow, S. J., Cochran, B., Kahn Jr, P. H., Lawler, J. J., Levin, P. S., Tandon, P. S., Varanasi, U., Wolf, K. L. et Wood, S. A. (2017). Nature Contact and Human Health: A Research Agenda. *Environmental Health Perspectives*, 125(7), 075001. <https://doi.org/10.1289/EHP1663>
- Gerrish, E. et Watkins, S. L. (2018). The relationship between urban forests and income: A meta-analysis. *Landscape and Urban Planning*, 170, 293-308. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.005>
- Ignatieva, M., Hughes, M., Chaudhary, A. K. et Mofrad, F. (2024). The Lawn as a Social and Cultural Phenomenon in Perth, Western Australia. *Land*, 13(2), 191. <https://doi.org/10.3390/land13020191>
- Landry, F., Dupras, J. et Messier, C. (2020). Convergence of urban forest and socio-economic indicators of resilience: A study of environmental inequality in four major cities in eastern Canada. *Landscape and Urban Planning*, 202, 103856. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103856>
- Leong, M., Dunn, R. R. et Trautwein, M. D. (2018). Biodiversity and socioeconomics in the city: a review of the luxury effect. *Biology Letters*, 14(5), 20180082. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2018.0082>
- Livesley, S. J., McPherson, E. G. et Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119-124. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567>
- Monteiro, J. A. (2017). Ecosystem services from turfgrass landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, 26, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.04.001>
- Montréal. (2019). *Vision dedéveloppementéconomiqueduterritoiresecteurindustriel dela Pointe-de-l'Île*. Document de consultation.
- MRNF. (2024). Découpages administratifs [SHP]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/dcoupages-administratifs>
- Pagano, M. A. et Bowman, A. O. (2000). Vacant Land in Cities: An Urban Resource. *Center on Urban & Metropolitan Policy*. <https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/paganofinal.pdf>
- Pham, T.-T.-H., Apparicio, P., Séguin, A.-M., Landry, S. et Gagnon, M. (2012). Spatial distribution of vegetation in Montreal: An uneven distribution or environmental inequity? *Landscape and Urban Planning*, 107(3), 214-224. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.06.002>
- Pourali, M. (2021). *Measuring and monitoring urban sprawl in Canada from 1991 to 201* [Concordia University]. <https://spectrum.library.concordia.ca/id/eprint/987639/>
- Pourali, M., Townsend, C., Kross, A., Guindon, A. et Jaeger, J. A. G. (2022). Urban sprawl in Canada: Values in all 33 Census Metropolitan Areas and corresponding 469 Census Subdivisions between 1991 and 2011. *Data in Brief*, 41, 107941. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107941>
- QGIS Development Team. (2023). Quantum GIS Geographic Information System. <https://www.qgis.org>
- Quinton, J., Nesbitt, L. et Czekajlo, A. (2022). Wealthy, educated, and... non-millennial? Variable patterns of distributional inequity in 31 Canadian cities. *Landscape and Urban Planning*, 227, 104535. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104535>
- R Core Development Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

- Ritchie, H., Rodés-Guirao, L., Mathieu, E., Gerber, M., Ortiz-Ospina, E., Hasell, J. et Roser, M. (2023). *Population Growth*. Published online at OurWorldInData.org. <https://ourworldindata.org/population-growth>
- Schell, C. J., Dyson, K., Fuentes, T. L., Des Roches, S., Harris, N. C., Miller, D. S., Woelfle-Eskine, C. A. et Lambert, M. R. (2020). The ecological and evolutionary consequences of systemic racism in urban environments. *Science*, 369(6510), eaay4497. <https://doi.org/10.1126/science.aay4497>
- Song, Y., Chen, B., Ho, H. C., Kwan, M.-P., Liu, D., Wang, F., Wang, J., Cai, J., Li, X., Xu, Y., He, Q., Wang, H., Xu, Q. et Song, Y. (2021). Observed inequality in urban greenspace exposure in China. *Environment International*, 156, 106778. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106778>
- Statistics Canada. (2021a). Dissemination area [SHP]. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/geo/sip-pis/boundary-limits/index2021-eng.cfm?year=21>
- Statistics Canada. (2021b). *The Canadian Index of Multiple Deprivation: user guide, 2021*. Statistics Canada = Statistique Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/45-20-0001/452000012023002-eng.htm>
- Statistics Canada. (2022). Census of Environment: Urban greenness, 2022. *Component of Statistics Canada Catalogue*, (11).
- St-Laurent, J. et Petridis, A. (2019). *Le Grand projet de la rue Saint-Maurice*. https://ceriu.qc.ca/system/files/2020-01/C1.5_Julien%20St-Laurent_Alexis%20Petridis.pdf
- Ville de Laval. (2017). *Schéma d'aménagement et de développement révisé (SADR) de la Ville de Laval*. <https://www.laval.ca/Documents/Pages/Fr/Citoyens/urbanisme-et-zonage/codification-administrative-schema-amenagement.pdf>
- Ville de Laval. (2023). *Plan climatique - Horizon 2035*. Ville de Laval.
- Ville de Laval. (2024). Périmètre du centre-ville du CDU [SHP]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cdu-perimetre-centre-ville>
- Watkins, S. L. et Gerrish, E. (2018). The relationship between urban forests and race: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 209, 152-168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.021>
- Wu, S., Chen, B., Webster, C., Xu, B. et Gong, P. (2023). Improved human greenspace exposure equality during 21st century urbanization. *Nature Communications*, 14(1), 6460. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41620-z>
- Yao, X., Yu, Z., Ma, W., Xiong, J. et Yang, G. (2024). Quantifying threshold effects of physiological health benefits in greenspace exposure. *Landscape and Urban Planning*, 241, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104917>
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J. et Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575-7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>

ANNEXE

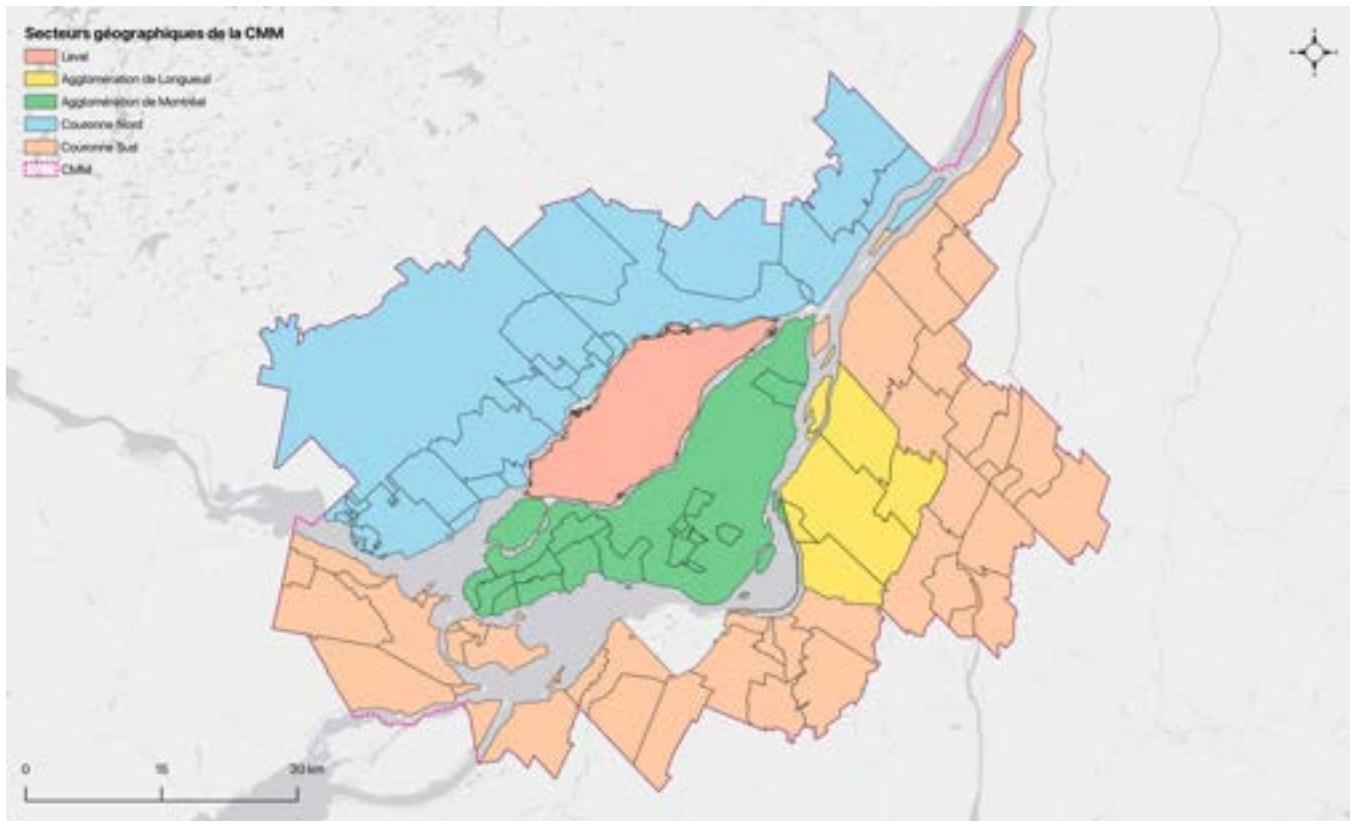


Figure S1. Secteurs géographiques de la CMM.

Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données provenant des Limites administratives (MRNF, 2024). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.

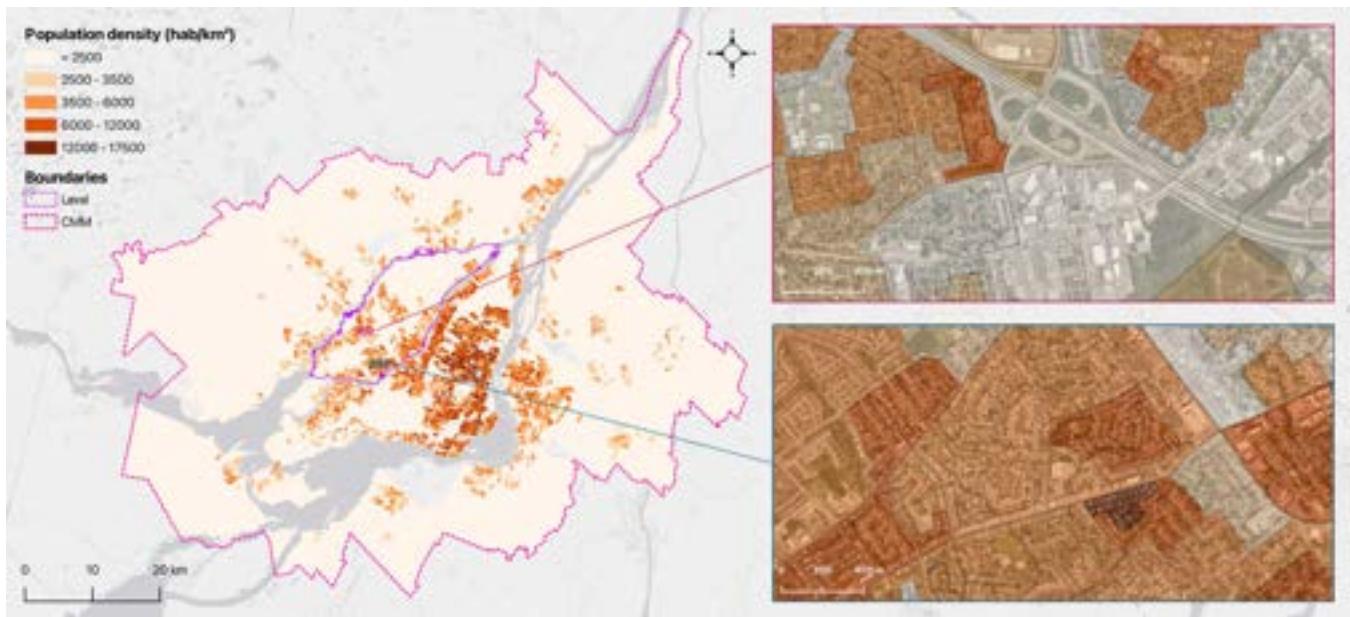


Figure S2. Densité de population, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.

Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Données tirées de l'Indice canadien de défavorisation multiple (Statistics Canada, 2021b); Aire de diffusion (Statistics Canada, 2021a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.



Figure S3. Utilisation du sol métropolitain, avec deux échantillons agrandis sur le territoire de Laval.

Référence spatiale : NAD 1983 (SCRS) MTM Zone 8. Source : données sur l'utilisation du sol (CMM, 2022a). Carte de base : GrayLight, EsriCanada.