

Rapport technique

Développement d'une méthode de priorisation des zones de verdissement se basant sur la qualité de l'air relevée par un réseau de capteurs de particules fines à Québec

NOVEMBRE 2024

PAR

Marine Duperat, Ph. D.

Samuel Royer-Tardif, biol. Ph. D.

Roberto Quesada Garcia, biol. Ph. D.

Charles Marseille, M. Sc.

Guillaume Simard, ing. B. Sc.

PRÉSENTÉ À

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

Direction de la qualité de l'atmosphère

Frédéric Morneau-Vaillancourt

Nancy Turcotte



Mots-clés :

Qualité de l'air, foresterie urbaine, sciences participatives, canopée, verdissement, technologie, analyses géospatiales.

Référence à citer :

Duperat M., Royer-Tardif S., Quezada Garcia R., Marseille C., Simard G. 2024. Développement d'une méthode de priorisation des zones de verdissement se basant sur la qualité de l'air relevée par un réseau de capteurs de particules fines à Québec. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). Rapport 2024-16. 42 pages + 3 annexes



Bénéficiaire du projet

Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

Direction de la qualité de l'atmosphère

Frédéric Morneau-Vaillancourt

Nancy Turcotte

Promoteur du projet

Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO)

Samuel Royer-Tardif, biol., Ph.D.

Marine Duperat, Ph. D.

Charles Marseille, M. Sc.

Xavier Gervais, M. Sc.

Roberto Quezada Garcia, biol. Ph. D.

Clément Coutier, techn. forest.

Damien Leblond, techn. inform.

Cédric Marcoux, techn. geomat.

Partenaires du projet

Cégep de Sainte-Foy

Guillaume Simard, enseignant en informatique et co-initiateur du projet Limoil'Air

Ville de Québec

Caroline Gates, conseillère en environnement

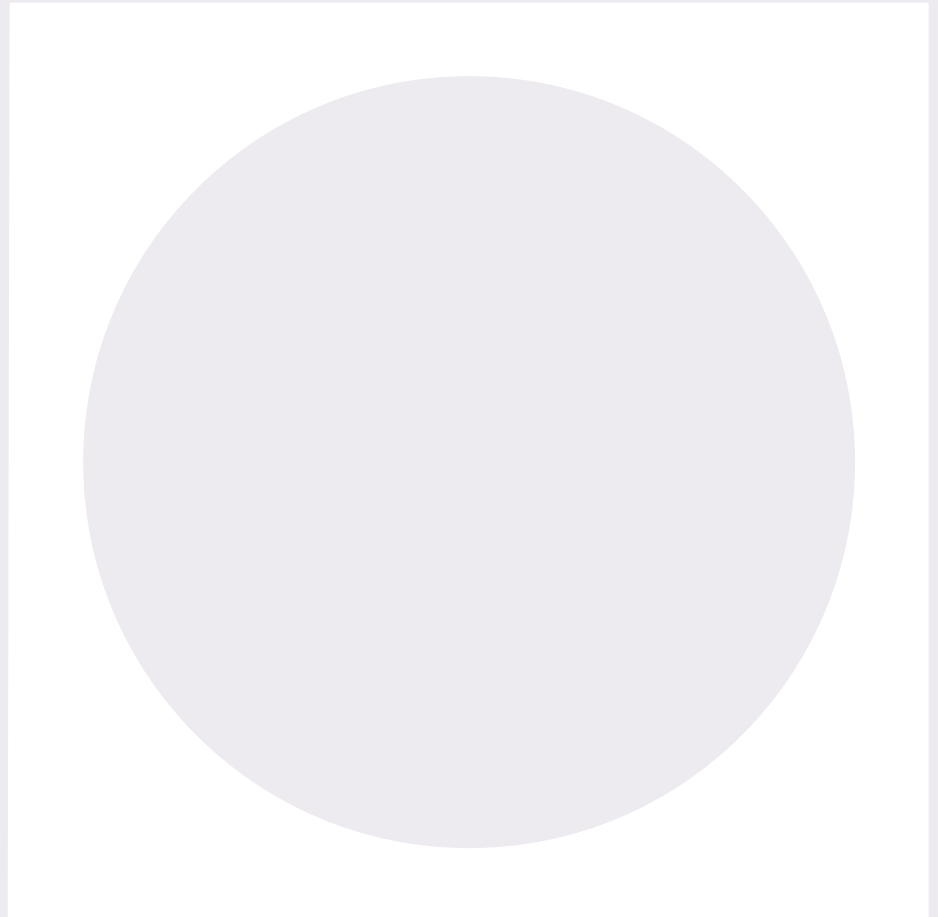


Table des matières

Bénéficiaire du projet	3
Promoteur du projet	3
Partenaires du projet	3
Table des matières	4
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Liste des abréviations	8
Remerciements	9
Résumé	10
Introduction	11
Objectifs	14
1. Méthodes	15
1.1. Capteurs utilisés	15
1.2. Réseau de capteurs	17
1.3. Validation des données	21
1.4. Interpolation spatiale des PM2.5 mesurées via le réseau de capteurs	22
1.5. Priorisation des zones à verdir	22
1.6. Comparaison avec des données satellitaires	26
2. Résultats	28
2.1. Interpolation spatiale des PM2.5	28
2.2. Zones de verdissement prioritaires	29
3. Discussion et recommandations	35



Conclusion	38
Références	39
Annexe 1 - Distribution des citoyens volontaires dans les quadrants (pollution vs canopée)	42
Annexe 2 - Données d'humidité relative (%) des capteurs de qualité de l'air	43
Annexe 3 - Secteurs de recensement classés prioritaires pour les initiatives de verdissement	44





Liste des figures

Figure 1 : Capteur de qualité de l'air. A) Boîtier avec ajout de panneau solaire; B) Capteur citoyen sans boîtier; C) Capteur citoyen vu d'en dessous.	15
Figure 2 : Carte de la présence de canopée sur l'emprise de la ville de Québec (année 2022 - résolution de 30 cm).	20
Figure 3 : Indice de canopée calculé par secteur de recensement (A) et par quartier (B) sur l'emprise de la ville de Québec.	24
Figure 4 : Code couleur des zones de priorisation en verdissement à l'échelle de la ville de Québec.	26
Figure 5 : Classement des secteurs de recensement par percentiles de PM2.5 annuelles moyennes satellitaires pour l'année 2022. (Données satellitaires de la <i>Washington University in Saint-Louis</i> - Shen, Li, Van Donkelaar, et al. 2024, V6.GL.02.02).	27
Figure 6 : Résultats de l'interpolation des données de PM2.5 annuelles moyennes issues des capteurs du CERFO et du réseau Limoil'Air à l'échelle de la ville de Québec pour la période d'octobre 2023 à octobre 2024. Les PM2.5 ont été classées par percentiles sur l'ensemble de l'emprise de la ville de Québec.	28
Figure 7 : Priorisation des besoins de verdissement sur l'emprise de la ville de Québec en fonction de la présence de canopée et la concentration de PM2.5 issues des données de capteurs de qualité de l'air installés par le CERFO et le réseau Limoil'Air.	30
Figure 8 : Priorisation des besoins de verdissement sur l'emprise de la ville de Québec en fonction de la présence de canopée et la concentration de PM2.5 issues des données satellitaires.	32
Figure 9 : Variabilité spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM2.5 à Québec, modélisées à partir de données issues de l'échantillonnage mobile pour l'ensemble de la zone d'étude élargie (données prises de juin 2019 à juin 2020 - carte extraite du rapport de Buteau, Smargiassi, et Goupil-Sormany - INSPQ 2023).	36



Liste des tableaux

Tableau 1 : Indice de canopée évalué par images satellitaires en 2020 pour les différents arrondissements de la ville de Québec (chiffres extraits du bilan de mi-parcours de « La vision de l'arbre 2015-2025 » de la Ville de Québec).	12
Tableau 2 : Description des composantes des capteurs citoyens et solaires.	16
Tableau 3 : Priorisation des zones de verdissement et définitions.	25
Tableau 4 : Résultat de la classification issue de l'interpolation des données de capteurs de qualité de l'air pour les secteurs de recensement.	29
Tableau 5 : Résultat de la classification issue de l'interpolation des données de capteurs de qualité de l'air pour les quartiers ciblés.	29
Tableau 6 : Résultat de la classification issue des données satellitaires pour les zones de recensement.	31
Tableau 7 : Résultat de la classification issue des données satellitaires pour les quartiers ciblés.	31
Tableau 8 : Répartition des percentiles en fonction des deux sources de données de PM2.5.	34
Tableau 9 : Comparaison des quartiers classés en zone prioritaire de verdissement selon les deux sources de données de PM2.5 moyennes annuelles. Les quartiers ayant été classés prioritaires pour le verdissement par les deux sources de données sont marqués en gras.	34



Liste des abréviations

INSPQ : Institut national de santé publique

LVBV : Secteurs de Limoilou, Vanier et de la Basse-Ville

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.

PM2.5 : Particules fines inférieures à 2,5 µm

RSQAQ : Réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec



Remerciements

Nous tenons à remercier le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs ainsi que le CRNSG pour leurs financements respectifs. Nous remercions également la ville de Québec pour les démarches entreprises dans le but de pouvoir installer nos capteurs sur les lampadaires.

Par ailleurs, nous tenons à remercier l'ensemble des citoyens de Québec qui se sont portés volontaires pour l'hébergement d'un capteur de qualité de l'air. Leur collaboration et leur accessibilité ont été des préalables non négligeables pour la réussite de cette étude.



Résumé

Ce projet présente les résultats d'une étude ayant suivi la qualité de l'air (définie ici par la concentration de PM2.5 uniquement) dans la ville de Québec sur une durée d'un an, à l'aide d'un réseau de capteurs fabriqués au CERFO et similaires à ceux déployés dans le cadre du projet Limoil'Air. Ces capteurs font appel à la technologie de l'Internet des objets et au système de communication LoRa afin de relayer les informations sur la qualité de l'air en temps réel. Ces données ont été utilisées pour créer une carte de la distribution spatiale des PM2.5 à l'échelle de la ville. Cette information a ensuite été couplée à celle disponible sur la couverture de la canopée urbaine, afin d'identifier les endroits prioritaires pour établir de futures initiatives de verdissement visant à améliorer la qualité de l'air.

Les résultats du projet ont été comparés à des données satellitaires de qualité de l'air prises à large échelle. Il a été constaté que les deux sources de données (capteurs et satellitaires) concordent partiellement dans leur priorisation de verdissement. Six quartiers identifiés dans les deux sources de données seraient à prioriser pour le verdissement. Il s'agit des quartiers de Saint-Roch, Vieux-Moulin, Vieux-Limoilou, Maizerets, Vieux-Bourg et le secteur des Ursulines. Selon la source de données utilisées pour évaluer la qualité de l'air, d'autres secteurs prioritaires pour le verdissement ont été relevés, de Beauport à l'est, à Sillery à l'ouest et jusqu'à Charlesbourg au nord, en incluant le secteur près de la tête des ponts dans Sainte-Foy et Cap-Rouge. Par conséquent, nous recommandons de poursuivre les efforts de caractérisation de la qualité de l'air dans ces secteurs.

Ce projet a également permis de démontrer que l'utilisation de données sur la qualité de l'air ajoute un complément d'information à celles déjà disponibles sur les îlots de chaleur, les zones d'accumulation d'eau lors de fortes pluies et la vulnérabilité de la population, dans le but de prioriser le choix des sites de verdissement. En effet, certains secteurs non prioritaires, selon ces autres informations, ont été identifiés comme prioritaires vis-à-vis de la qualité de l'air, la situation inverse ayant également été observée. Ces résultats indiquent qu'il serait possible et souhaitable d'intégrer la qualité de l'air dans les exercices de priorisation des sites à verdir.



Introduction

Enjeu des particules fines pour la qualité de l'air

La pollution atmosphérique est un facteur important affectant la qualité des milieux de vie urbains. Il existe actuellement un vif intérêt de la population québécoise envers les enjeux liés à la qualité de l'air (Gauthray-Guyénet *et al.* 2022; Direction de santé publique 2023; Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023). Les particules fines sont souvent le groupe de polluants affectant le plus la qualité de l'air. Elles peuvent se présenter sous forme solide, liquide ou un mélange des deux (Santé Canada 2021b) et forment l'un des principaux composants du « smog » des milieux urbains (Environnement et Changement climatique Canada 2018). On distingue essentiellement les particules fines d'après leur taille : les particules comprises entre 10 µm (microns) et 2,5 µm de diamètre sont appelées PM10, alors que celles inférieures à 2,5 µm sont appelées **PM2.5**. Ces dernières sont plus préoccupantes, puisqu'elles demeurent plus longtemps en suspension et peuvent pénétrer en profondeur dans le système respiratoire (Santé Canada 2021a; Buteau, Smargiassi, et Goupil-Sormany 2023).

Dans la ville de Québec, les concentrations en PM2.5 sont assez élevées comparativement aux autres grands bassins urbains canadiens (Environnement et Changement climatique Canada 2018). Sa concentration moyenne annuelle s'établissait au deuxième rang canadien en 2016 avec 8,2 µg.m⁻³, derrière la ville de Windsor (8,3 µg.m⁻³). Cependant, les concentrations varient grandement en fonction de la position de la station de mesure des particules fines sur le territoire de la ville. Ainsi, les stations de mesure situées près des grands axes autoroutiers comme celles du Vieux-Limoilou (proche de l'échangeur de l'A440) enregistrent régulièrement des concentrations supérieures à 8,8 µg.m⁻³ (Environnement et Changement climatique Canada 2021), soit la norme canadienne de qualité de l'air ambiant pour la moyenne annuelle de PM2.5. En février 2022, le MELCCFP annonçait la formation d'un groupe de travail indépendant sur les contaminants atmosphériques (GTCA) chargé de dresser un portrait de la contamination de l'air dans ces secteurs. Depuis, ce groupe a identifié les PM2.5 comme étant les principaux polluants atmosphériques d'importance dans ce secteur, et ce, en plus de cibler le verdissement urbain comme une solution potentielle pour atténuer la problématique (Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023a).

Canopée urbaine et qualité de l'air

Il est reconnu que la couverture de la canopée urbaine peut contribuer à l'amélioration la qualité de l'air à l'échelle d'un quartier ou d'un arrondissement (Wu *et al.* 2021). Les zones ayant des surfaces de forêts urbaines plus importantes présentent généralement des concentrations de particules fines moins importantes (Irga, Burchett, et Torpy 2015). Le trafic routier étant une source majeure de polluants atmosphériques en milieu urbain, il a été démontré que des bandes vertes composées d'arbres pouvaient réduire les concentrations de PM2.5 à proximité des axes routiers (Chen *et al.* 2015; Tong *et al.* 2015). En effet, les éléments composant une forêt urbaine peuvent retarder la dispersion des PM2.5, en plus d'en capter une partie par dépôt, contribuant ainsi à l'atténuation des concentrations de particules fines (Tong *et al.* 2015). Une revue de littérature du CERFO a été réalisée à ce sujet (Gauthray-Guyénet *et al.* 2022).



Il est estimé que 47 % de la zone urbaine (ceinture forestière incluse) de la ville de Québec sont couverts par des espaces arborés, dont 6 % sont sempervirents (plantes qui gardent leurs feuilles tout au long de l'année). Les quantités annuelles de PM2.5 captées sont estimées à 47,4 t pour la ville. Cette valeur est issue d'une étude pancanadienne faisant état de moyennes pour chaque zone urbaine considérée (Nowak *et al.* 2018). Toutefois, il est important de considérer que cette captation peut varier spatialement de façon très importante à l'intérieur d'une ville (Escobedo et Nowak 2009). Cette variation spatiale a également été observée par Wood *et al.* (2018) qui estimaient à 16,09 t la quantité de PM2.5 captée annuellement par les arbres municipaux sur le territoire de Québec.

Caractériser le territoire pour prioriser les initiatives de verdissement

La *Vision de l'arbre 2015-2025* de la Ville de Québec a pour objectif d'augmenter l'indice de canopée à 35 % d'ici 2025 en proposant des efforts supplémentaires de verdissement, de plantation d'arbres et de déminéralisation (Ville de Québec 2015). Dans son bilan de mi-parcours en 2020, la Ville a annoncé une stratégie de plantation intensive, soit de planter 100 000 arbres d'ici 2027 pour prioriser notamment les quartiers centraux à faibles indices de canopée (Ville de Québec 2020).

Bien que l'effet bénéfique des arbres sur la qualité de l'air soit relativement bien connu, il existe encore peu ou pas de lignes directrices permettant de prioriser les secteurs où les initiatives de verdissement devraient être établis, dans le but de maximiser les impacts sur la qualité de l'air. De façon intuitive, ces initiatives devraient être implantées dans les secteurs où la qualité de l'air représente de forts enjeux et où l'on note un déficit de canopée. Une telle approche pourrait s'inspirer des analyses multicritères réalisées pour réduire les risques liés aux changements climatiques (îlots de chaleur et fortes pluies) telles que celles développées dans le cadre du programme OASIS (MELCCFP 2023). Toutefois, cette approche nécessiterait à la fois une cartographie de la variation à fine échelle de la qualité de l'air et de la canopée urbaine.

En collaboration avec l'Institut national de santé publique, le CERFO a réalisé la cartographie de la canopée urbaine des six régions métropolitaines de recensement du Québec à une résolution spatiale d'un mètre. Pour la ville de Québec, l'indice de canopée se situait autour de 31 % en 2020, avec une répartition inégale de la canopée entre les différents arrondissements (voir tableau 1, Ville de Québec 2020; Varin *et al.* 2020).

Tableau 1 : Indice de canopée évalué par images satellitaires en 2020 pour les différents arrondissements de la ville de Québec (chiffres extraits du bilan de mi-parcours de « La vision de l'arbre 2015-2025 » de la Ville de Québec).

Arrondissement	Indice de canopée 2020 (*)
Beauport	26 %
Charlesbourg	38 %
La Cité-Limoilou	20 %
La Haute-Saint-Charles	40 %
Les Rivières	25 %
Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge	32 %
Ville de Québec	31 %

(*) Ces données ne concernent que le périmètre urbain de la ville de Québec et excluent la ceinture forestière.



Suivi de la qualité de l'air

Parallèlement à la *Vision de l'arbre 2015-2025*, la Ville de Québec s'est également dotée d'un plan d'action 2023-2027 pour une saine qualité de l'air extérieur (Division de la prévention et du contrôle environnemental 2023). Ce premier plan d'action, favorisant également le suivi et l'amélioration de la qualité de l'air sur le territoire de Québec, vise sept axes principaux, dont la modélisation et l'amélioration des connaissances locales.

Le réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec (**RSQAQ**) déploie et entretient un réseau de stations réparties sur le territoire québécois. Pour la région de Québec, six stations suivent quotidiennement l'évolution des concentrations atmosphériques de PM_{2.5}. Toutefois, ce nombre limité de stations ne permet pas d'avoir une résolution à fine échelle. Quelques stations additionnelles en milieu industriel ont été déployées depuis 2022 à proximité de Limoilou, Vanier et de la Basse-Ville (**LVBV**), mais demeurent limitées dans leur potentiel de caractérisation de la variation spatiale de la qualité de l'air à l'échelle de la ville entière (Division de la prévention et du contrôle environnemental 2023).

De récentes initiatives permettent de mieux quantifier cette variation spatiale. Tout d'abord, un projet de l'INSPQ, en collaboration avec la Ville de Québec et le MELCCFP, a permis d'établir une cartographie de la qualité de l'air à partir d'un réseau de capteurs fixes et de capteurs mobiles installés sur une voiture électrique (Buteau, Smargiassi, et Goupil-Sormany 2023; Clark *et al.* 2024). Toutefois, ces données ne sont pas encore disponibles pour être intégrées avec la canopée urbaine. L'INSPQ rend cependant disponibles des données de PM_{2.5} pour toutes les aires de diffusion de la ville de Québec par le biais de son Géoportail (INSPQ 2023). Ces données sont issues des travaux du *Atmospheric Composition Analysis Group* de l'université de Washington à Saint-Louis (É.-U.). Elles sont basées majoritairement sur les données satellitaires de 2010 à 2012 et ont été ajustées à l'aide de données des stations officielles du RSQAQ (Van Donkelaar *et al.* 2021). Malgré leur disponibilité et leur grande couverture spatiale, ces données prises en 2010-2012 peuvent ne plus refléter les conditions actuelles de la qualité de l'air (2023-2024).

L'accessibilité grandissante des composantes électroniques et les initiatives de prototypage ouvert permettent maintenant le développement de capteurs de qualité de l'air moins coûteux que les appareils certifiés utilisés par le RSQAQ ou d'autres centres de recherche. Ces avancées ont pavé la voie à des projets de science citoyenne permettant d'accroître grandement le nombre de stations de mesure de PM_{2.5} sur un territoire. On note entre autres l'initiative PurpleAir (2024) qui détient un réseau de capteurs déployés dans de nombreux pays à travers le monde. De façon plus locale, dans la ville de Québec, le projet Limoil'Air est une initiative de science citoyenne amorcée en 2021 et qui a débuté un projet de suivi de la qualité de l'air en 2022 à partir de capteurs développés et assemblés au Cégep de Sainte-Foy. Ces données sont accessibles à tous par le biais de la plateforme RevolvAir (RevolvAir.org 2021), mais limitées majoritairement aux territoires de LVBV.

Ce rapport présente les résultats d'un projet de recherche ayant cartographié les concentrations de PM_{2.5} à l'aide d'un réseau de capteurs de qualité de l'air répartis sur l'emprise de la ville de Québec, incluant les villes de L'Ancienne-Lorette et de Wendake, et le secteur des Ursulines, dans le but d'orienter le choix des zones à favoriser pour des projets de verdissement.



Objectifs

Le but global de ce projet est d'orienter les initiatives de verdissement dévouées à améliorer la qualité de l'air en milieu urbain en reliant les données de la canopée urbaine à des données de présence de particules fines (PM2.5) acquises grâce à un réseau de capteurs connectés à Internet.

De façon plus spécifique, le projet poursuit trois objectifs :

1.

Établir un réseau de capteurs connectés (Internet des objets) permettant de suivre en temps réel la concentration de PM2.5 et couvrant un large gradient de qualité de l'air et de couverture végétale.

2.

Mettre en relation la concentration de PM2.5 à la canopée urbaine retrouvée sur le territoire.

3.

Identifier les secteurs où prioriser les projets de verdissement visant à réduire les concentrations de PM2.5.



1. Méthodes

1.1. Capteurs utilisés

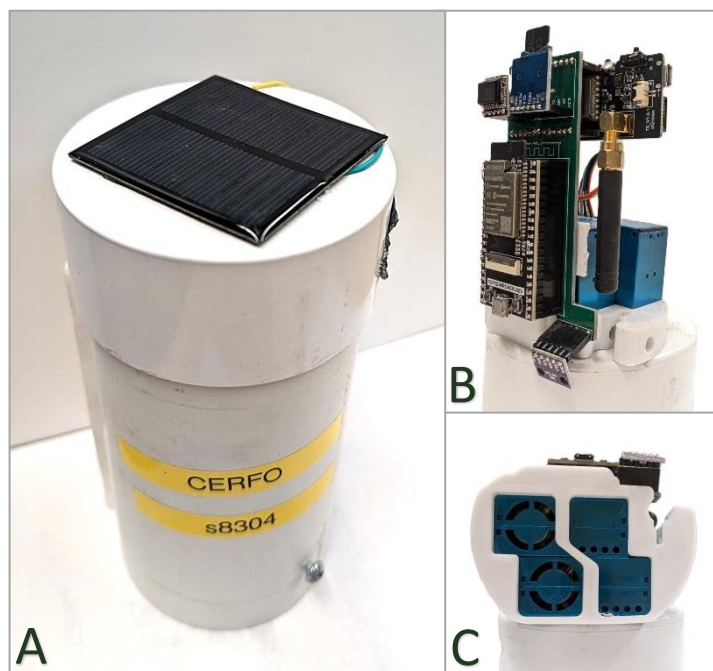


Figure 1 : Capteur de qualité de l'air. A) Boîtier avec ajout de panneau solaire; B) Capteur citoyen sans boîtier; C) Capteur citoyen vu d'en dessous.

La conception des capteurs fabriqués dans le cadre de ce projet (**Figure 1**) est basée sur les travaux de Guillaume Simard, réalisés dans le cadre du réseau Limoil'Air (RevolvAir.org 2021). Ces capteurs permettent de mesurer les particules fines inférieures à $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}) et des variables environnementales locales (température, humidité relative et pression atmosphérique). Afin de répondre aux besoins du présent projet, des modifications importantes ont dû être effectuées et deux modèles de capteurs ont été développés : un capteur citoyen devant être branché dans une prise de courant pour l'alimentation et un capteur solaire à alimentation électrique autonome (**Tableau 2**).



Tableau 2 : Description des composantes des capteurs citoyens et solaires.

Composante	Description	Capteur citoyen	Capteur solaire
PMS #1	Unité de mesure de particules fines (modèle <i>PMS5003T</i> de l'entreprise PlantTower, Chine). Cette unité est la plus utilisée dans le domaine de la mesure de la qualité de l'air, notamment dans les capteurs de la marque PurpleAir. L'unité permet la mesure de la concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des particules fines de tailles inférieures à $1\ \mu\text{m}$, $2,5\ \mu\text{m}$ et $10\ \mu\text{m}$. Notre projet se concentre sur les particules inférieures à $2,5\ \mu\text{m}$.	X	X
PMS #2	PMS additionnel (redondance)	X	
BME	Capteur environnemental pour la mesure de la pression atmosphérique, l'humidité relative et la température (modèle <i>BME280</i> de l'entreprise Bosch Sensortech, Allemagne). Ce capteur a été ajouté pour offrir la possibilité de corriger les valeurs de PM2.5 en fonction de l'humidité relative locale.	X	X
SD	Lecteur de carte SD pour la sauvegarde locale des données.	X	X
Wrover	Microcontrôleur principal, soit « l'ordinateur » du capteur (Modèle <i>ESP32</i> de l'entreprise Espressif Systems, Chine)	X	X
RTC	Horloge synchronisée (modèle <i>DS3231</i>) incluant une batterie de type cellule	X	X
PCB	Circuit imprimé qui permet de connecter l'ensemble des composantes	X	X
Support	Support qui permet de tenir les composantes ensemble, imprimé avec le matériau PLA par une imprimante 3D (modèle)	X	X
LoRa32	Microcontrôleur de communication (Modèle <i>LoRa ESP32 - T3 v1.6.1</i> , de l'entreprise Lilygo, Chine). La technologie LoRa (<i>Long Range</i> , longue distance) est un protocole qui permet le transfert de messages courts, soit de l'ordre de 250 caractères par message, à de très grandes distances et à faible puissance. Un des avantages de cette technologie est qu'elle est très robuste par rapport au bruit électromagnétique dans la plage de fréquence de travail (ici, 915 MHz). Comme une panoplie d'appareils utilisent cette bande de fréquence, il est primordial de pouvoir séparer le signal d'intérêt des autres signaux présents dans cette bande. À l'aide de cette technologie, on peut alors connecter des capteurs qui n'ont pas accès à un Wi-Fi afin d'obtenir leurs mesures en temps réel.	X	X
Alimentation	Le capteur est alimenté en continu par un transformateur de tension AC-DC.	AC/DC	Panneau solaire 0.5W
Transmission des données	Mode d'envoi des données sur la base de données nuagiques.	LoRa Wi-Fi	LoRa
Batterie	Le capteur est alimenté par une batterie au lithium-ion de type 18650. Rechargée via le panneau solaire.		X
Cycle	Le capteur suit un cycle d'éveil et de sommeil profond permettant de réduire le courant à une moyenne de $100\ \mu\text{A}$.		X



La séquence de mesure décrite ci-après est la même pour les deux modèles de capteurs. L'appareil est d'abord alimenté et les composantes sont initialisées (RTC, BME, PMS et carte SD). La séquence de mesure des PMS est alors démarrée et dure environ 10 secondes. Ensuite, la mesure de la pression, de l'humidité relative et de la température est effectuée. Finalement, les données sont sauvegardées sur la carte SD et envoyées par Wi-Fi ou par LoRa. Le capteur est alors mis en veille jusqu'à la prochaine séquence de mesure (capteurs solaires).

1.2. Réseau de capteurs

1.2.1. Transmission des données

Les capteurs ont deux types de transmission de données : via le réseau Wi-Fi (pour la majorité de capteurs citoyens) ou via le réseau LoRa (pour certains capteurs citoyens et les capteurs solaires). Les capteurs citoyens sont connectés au Wi-Fi des citoyens participants lorsqu'ils en sont équipés. Ces capteurs agissent comme des relais pour les messages reçus sur le réseau LoRa. Si un capteur citoyen perd sa connexion Wi-Fi, il enverra son message sur le réseau LoRa, qui sera capté par un autre capteur citoyen, qui à son tour pourra l'envoyer à la base de données nuagique. Cette stratégie représente donc une redondance de connectivité des capteurs. De la même façon, ce réseau de capteurs permet de recevoir des messages des capteurs solaires qui, eux, ne communiquent que par le réseau LoRa, n'ayant pas de point d'accès Wi-Fi à proximité. La séquence de mesure des données est effectuée en moyenne toutes les 10 minutes. Un délai aléatoire entre 0 et 60 secondes assure qu'il n'y ait pas d'interférence systématique entre les messages envoyés entre deux capteurs. Si deux messages de différents capteurs se retrouvent concurrents, ils ne le seront pas à la prochaine acquisition. Ceci garantit un minimum de perte de données causée par la densité du réseau.

1.2.2. Stockage des données

Une fois captées et transmises sur l'un des réseaux de communication (Wi-Fi/LoRa), les données sont transmises par l'intermédiaire d'un pont utilisant le protocole MQTT, dont le courtier (*broker* en anglais) est hébergé sur une instance EC2 des services web d'Amazon (AWS). Cette approche utilise le concept de publication/abonnement (*publish/subscribe* en anglais) qui est une stratégie répandue dans le domaine des mesures temporelles et de l'Internet of Things (réseau de capteurs) en général. L'intérêt est qu'il est facile de se connecter au serveur et d'isoler des canaux de transmission, tout en ayant la possibilité d'encoder les communications, et ce, avec des outils simples et légers d'utilisation. Dans le cas de ce projet, un canal unique existe pour chaque instrument, ce qui rend très simple la tâche de distribution d'allocation. Les données transmises sont sauvegardées sur une base de données *InfluxDB* hébergée sur un serveur Linux AWS. Le lien entre la base de données et le courtier MQTT est assuré par le *plugin* Telegraf qui s'abonne à tous les canaux des capteurs du présent projet. Une conversion des unités temporelles est effectuée afin d'obtenir l'heure locale et de gérer les changements d'heure causés par notre position géographique (*Daylight Saving Time*). Les données, une fois sauvegardées dans la base de données, sont alors accessibles sous format tabulaire suivant une librairie de requête mise au point pour les besoins du projet.



1.2.3. Sites d'installation des capteurs

Afin d'installer les capteurs connectés à un réseau Wi-Fi, nous avons fait appel aux citoyens de Québec, notamment lors d'une entrevue à la radio locale qui a permis au projet de se faire connaître. Au total, 95 citoyens ont signalé leur intérêt à participer au projet. Sur ces 95 citoyens, une partie importante était résidente en basse ville, principalement dans le quartier Limoilou, là où la concentration de PM2.5 est reconnue pour être plus élevée (Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023a). Le réseau de capteurs du projet Limoil'Air se concentre déjà sur ce quartier en question (RevolvAir.org 2 021; Verret 2023; Université Laval 2024). Nous avons donc décidé de sélectionner des citoyens résidents à l'extérieur de Limoilou pour avoir une plus grande répartition spatiale à l'échelle de la ville de Québec. Pour évaluer les sites à échantillonner, l'ensemble de la ville a été découpé en polygones de 300 m x 300 m (soit 0,09 km²). Ces polygones ont ensuite été classés suivant deux variables : la densité de canopée et une approximation de leur niveau d'exposition aux particules fines.

1.2.3.1. Densité de canopée

À partir de la couche de données raster produite par le CERFO (Varin *et al.* 2020) qui présente la couverture de canopée de plus de 2 m de haut, une densité de canopée ρ a été calculée suivant cette équation :

$$\rho = \left(\frac{1}{R_x}\right)^2 \sum^n (\text{pixel} > 0)$$

avec R_x , la résolution en x de la couche de données (identique en y), et n le nombre de pixels dans une surface de 1 m². Cette densité est calculée initialement en mètres puis elle est rééchantillonnée selon l'échelle de travail souhaitée. Dans notre cas, cela revient à calculer la somme des pixels (m²) par polygone et à la diviser par l'étendue de ce dernier (0,09 km²). On obtient alors un pourcentage de canopée par polygone. La Figure 2 montre la couche raster utilisée dans notre analyse, chaque pixel vert représentant un point (30 cm x 30 cm) de la ville où la hauteur de canopée est supérieure à 2 m (Varin *et al.* 2020).

1.2.3.2. Indice d'exposition aux particules fines

Pour définir un indice d'exposition aux particules fines, nous avons identifié les principales sources d'émissions de particules fines en ville : le trafic routier dense (Karner *et al.* 2010; Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de Montréal 2017), le chauffage au bois et les industries polluantes (Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023a). Les autoroutes sont des points névralgiques de trafic routier, particulièrement aux entrées et sorties où les freinages et l'accélération des véhicules sont connus pour émettre une grande quantité de particules fines. En conséquence, les échangeurs et les carrefours des principales autoroutes et boulevards de la ville de Québec ont été géolocalisés. Les industries émettrices de particules fines de la ville ont également été ajoutées à la cartographie en se basant sur plusieurs rapports (Brière 2015; Busque 2022; Buteau *et al.* 2023; Direction de santé publique 2023a; 2023b; Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023; Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) 2021; 2022; 2024).



Sur l'étendue de la ville de Québec, ce sont en tout 113 sites émetteurs de particules fines qui ont été identifiés et géolocalisés.

Nous avons développé un indice d'exposition aux particules fines défini tel que :

$$I_{epf} = \sum_i^n \frac{\frac{1}{d_i}}{\max\left(\frac{1}{d_i}\right)}$$

où d est la distance entre la position du citoyen et la position de la source de pollution, et n le nombre total de sources de pollution. Il a été décidé de ne pas pondérer cet indice par la quantité de PM2.5 émises afin de faciliter son interprétation.



1.2.3.3. Classement préliminaire des sites

Pour répartir nos sites d'échantillonnages sur le territoire, nous avons divisé nos sites en quatre groupes. Ces groupes ont été déterminés grâce à une valeur seuil de densité de canopée et d'indice d'exposition. Pour la densité de canopée, un objectif concret est d'avoir une densité de couverture végétale d'au moins 30 % dans un rayon de 300 m de toute résidence à l'échelle de la ville (Konijnendijk 2021; INSPQ 2023). Nous avons donc utilisé une valeur seuil de 30 % de canopée pour cette étape préliminaire. Concernant l'indice d'exposition aux particules fines, la distribution des valeurs d'exposition de tous les polygones a été analysée en effectuant un histogramme des valeurs. Celui-ci permet d'observer une valeur centrale de 0,5 qui a été sélectionnée comme valeur seuil pour la distinction de la classe « basse exposition » de la classe « haute exposition ». À partir de ces deux valeurs seuils, quatre catégories ont été définies telles que :

- Catégorie 1 : indice de canopée > 30 %, Indice d'exposition aux particules fines > 0,5
- Catégorie 2 : indice de canopée < 30 %, Indice d'exposition aux particules fines > 0,5
- Catégorie 3 : indice de canopée < 30 %, Indice d'exposition aux particules fines < 0,5
- Catégorie 4 : indice de canopée > 30 %, Indice d'exposition aux particules fines < 0,5

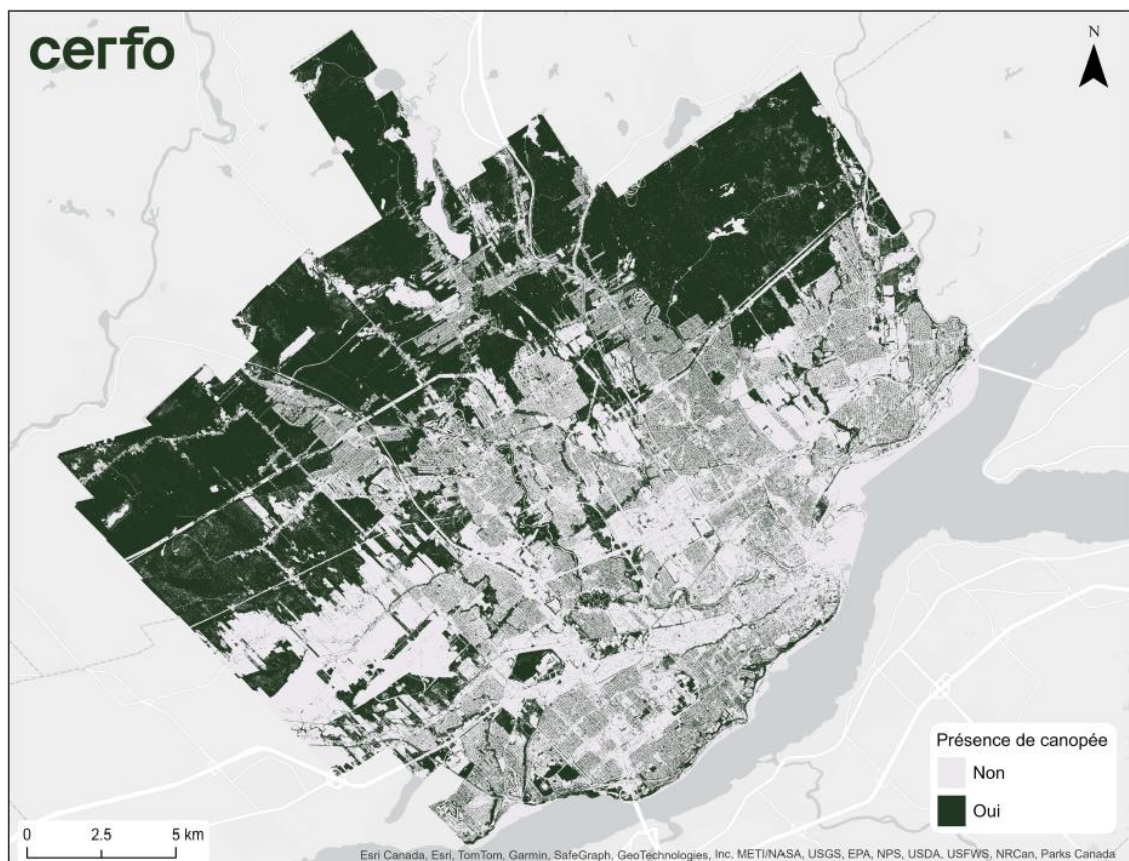


Figure 2 : Carte de la présence de canopée sur l'emprise de la ville de Québec (année 2022 - résolution de 30 cm).



Les citoyens ont été sélectionnés en favorisant autant la répartition spatiale sur le territoire de la ville de Québec que leur distribution au sein des quadrants (Annexe 1). La plus forte contrainte dans la sélection des sites d'échantillonnages a résidé dans le fait que la majorité des citoyens se sentant concernés par l'étude se trouvent soit dans une zone où la densité de canopée est faible, soit dans une zone où l'indice d'exposition aux particules fines est élevé. Notre solution pour répondre à ce problème de répartition de l'échantillonnage a été de recourir à l'utilisation de capteurs solaires « autonomes » du point de vue de l'alimentation électrique. Ces capteurs nous permettent ainsi d'aller également échantillonner des sites de catégorie 1, soit avec un fort indice de canopée et une haute exposition aux particules fines. Pour pouvoir échantillonner ces sites de catégorie 1, nous avons reçu l'autorisation de la Ville de Québec pour installer des capteurs solaires sur des lampadaires.

1.2.3.4. Sites échantillonnés

Au total, 47 capteurs ont été installés chez des citoyens et 15 capteurs solaires ont été installés sur des lampadaires. Toutefois, certains enjeux techniques (enjeux d'autonomie énergétique, problèmes de connexion) ont limité l'acquisition des données des capteurs solaires, de sorte que seuls 4 capteurs solaires ont pu être conservés pour les analyses. La période d'acquisition des données s'est étendue de septembre 2023 à début octobre 2024, soit une année complète. Un suivi régulier des capteurs et la coopération des citoyens ont permis de maintenir l'acquisition des données de PM2.5 pendant une majeure partie de la période d'acquisition.

1.3. Validation des données

Une validation des données de PM2.5 a été effectuée en amont de l'analyse spatiale. Cette étape sert de filtre et nous permet d'assurer une qualité constante des données utilisées. À cette étape, les données des capteurs du réseau Limoil'Air (RevolvAir.org 2021), incluant des données PurpleAir (2024), ont été ajoutées aux données prises par les capteurs du CERFO pour couvrir les environs du quartier Limoilou. Pour assurer une homogénéité des données, les données du réseau Limoil'Air, qui ont été ajoutées aux analyses, concernent la même période temporelle que les données du CERFO. Les deux types de données ont été filtrées et traitées selon la même méthode.

La première étape de validation des données sert à la détection de valeurs aberrantes (*outlier* en anglais). Les données ont été filtrées selon les critères suivants pour chacun des capteurs, individuellement. Les valeurs extrêmes ont été retirées, soit les valeurs égales et inférieures à 0, et les valeurs supérieures à 1 000. Les données de chaque capteur ont été groupées par périodes d'une heure et les percentiles de chaque période ont été calculés. Les valeurs supérieures à 1,5 fois le 75^e percentile de chaque période ont été retirées. Les données manquantes ainsi créées ont par la suite été remplacées par la médiane de PM2.5 pour le capteur et la période donnée.

La seconde étape a consisté en l'évaluation du pourcentage de données manquantes qui a été calculé pour chacun des capteurs. Les capteurs ayant moins de 1 000 observations ont été retirés. Ces capteurs représentaient plus de 75 % de toutes les données manquantes du réseau.

Les séries temporelles et l'autocorrélation des données de chaque capteur ont été vérifiées. Les séries temporelles étaient du type stationnaire, donc, aucune transformation n'était requise. Rendu à cette étape, un seul capteur ne



respectait pas les conditions requises, en présentant une forte autocorrélation de ses données. Nous avons décidé de le retirer de l'analyse.

Il est à noter que nous n'avons pas pu corriger les valeurs brutes de PM2.5 en fonction de l'humidité relative locale mesurée par les capteurs BME en raison de l'instabilité des valeurs d'humidité obtenues (Annexe 2). En conséquence, il est important de considérer que les valeurs de PM2.5 pourraient être biaisées en fonction de l'humidité. Il n'est donc pas possible de comparer directement les valeurs de PM2.5 relevées dans cette étude avec celles provenant d'autres sources. Toutefois, puisque notre intérêt réside surtout dans la priorisation des sites de verdissement, nous jugeons que ces données sont pertinentes pour une comparaison relative entre les différents secteurs de la ville de Québec.

1.4. Interpolation spatiale des PM2.5 mesurées via le réseau de capteurs

À la suite de l'étape de validation des données, 49 capteurs du CERFO (sur les 51 initiaux) et 19 capteurs du réseau Limoil'Air ont été retenus pour l'interpolation.

L'interpolation a été réalisée par *krigeage* à l'aide de l'outil Assistant de géostatistiques du logiciel ArcGIS Pro (ESRI 2024, v3.2.2). Les données de PM2.5 ont été regroupées par capteurs pour en calculer leur moyenne annuelle. Le reste des analyses se base ainsi sur une donnée unique par point. La première étape a consisté en une analyse exploratoire des moyennes annuelles pour en vérifier leur distribution. Le *krigeage* n'a pas besoin que les données suivent une distribution normale, mais il performe mieux si la distribution des données s'approche de cette distribution. Ce fut le cas pour nos données annuelles moyennes. Les valeurs résiduelles des erreurs ont ensuite été vérifiées et une visualisation de la tendance des données dans l'espace a été faite via ArcMap.

À la suite de ces vérifications, une interpolation via *krigeage* ordinaire a été effectuée, avec une suppression de la tendance de deuxième ordre et un ajustement du modèle sphérique (Baillargeon 2005). Ce modèle de *krigeage* a été vérifié par validation croisée. C'est une méthode « leave-one-out » (exclusion d'une partie des données) qui permet de séparer l'échantillon en deux : un gros groupe de données qui sert à créer le modèle, un petit groupe de données qui sert à valider les prédictions du modèle.

1.5. Priorisation des zones à verdir

Pour cette étude, nous avons fait le choix de prioriser les zones de verdissement via deux échelles spatiales : les secteurs de recensement et les quartiers.

Les secteurs de recensement sont de petites régions géographiques qui comptent habituellement une population de moins de 7 500 habitants, la moyenne privilégiée étant de 5 000 habitants (Gouvernement du Canada 2021). Nous avons choisi d'utiliser les secteurs de recensement comme « zonage », car ils doivent être les plus homogènes possible sur le plan des caractéristiques socio-économiques de leurs habitants, soit présenter des similitudes de situation économique et de conditions de vie, lorsqu'ils sont créés. Cela permet facilement de faire le lien entre les besoins de verdissement et de nombreux autres facteurs influençant la qualité de vie des citoyens.



Les quartiers, quant à eux, sont les régions géographiques les plus simples à localiser pour le grand public. Il nous a semblé important de rendre nos résultats facilement interprétables en offrant également un bilan « par quartier », même si cela crée une perte d'informations au niveau de l'échelle spatiale à cause de la grande taille des quartiers. Les deux informations sont à traiter de façons complémentaires.

Les zones à verdier, qu'elles soient à l'échelle du secteur de recensement ou du quartier, ont été priorisées en fonction de deux critères : l'indice de canopée et le percentile de PM2.5.

Les données de canopée utilisées sont celles qui ont été produites par le CERFO en 2020 et mises à jour en 2022 (Varin *et al.* 2020). Le raster de canopée définit la présence d'arbres de plus de 2 m de haut à une résolution initiale de 0,33 m x 0,33 m (**Figure 2**). L'indice de canopée est défini comme le pourcentage de pixels avec canopée dans une zone donnée (secteur de recensement ou quartier). Le seuil utilisé pour le classement est basé sur les objectifs de verdissement de la Ville de Québec pour sa *Vision de l'Arbre 2015-2025* (Ville de Québec 2015), soit une cible de 35 % de canopée. La **Figure 3** montre le pourcentage de canopée par secteur de recensement (A) et par quartier (B).

Les données de PM2.5 utilisées sont celles que nous avons interpolées à l'aide des capteurs de qualité de l'air (CERFO et réseaux Limoil'Air). La moyenne de PM2.5 a été calculée par zone et les zones ont été classées par percentiles. Le classement par percentiles permet de comparer le niveau de pollution des zones de manière relative. Le seuil du 70e percentile a été retenu pour séparer les zones avec la plus forte moyenne annuelle de PM2.5. Ce seuil a été choisi de façon arbitraire, pour prioriser les zones ayant la plus forte présence de particules fines.

En tenant compte de ces deux facteurs (canopée et PM2.5), la priorisation des zones de verdissement a été définie telle que dans le **Tableau 3**. Le code couleur de chaque catégorie est défini en **Figure 4** pour la cartographie.

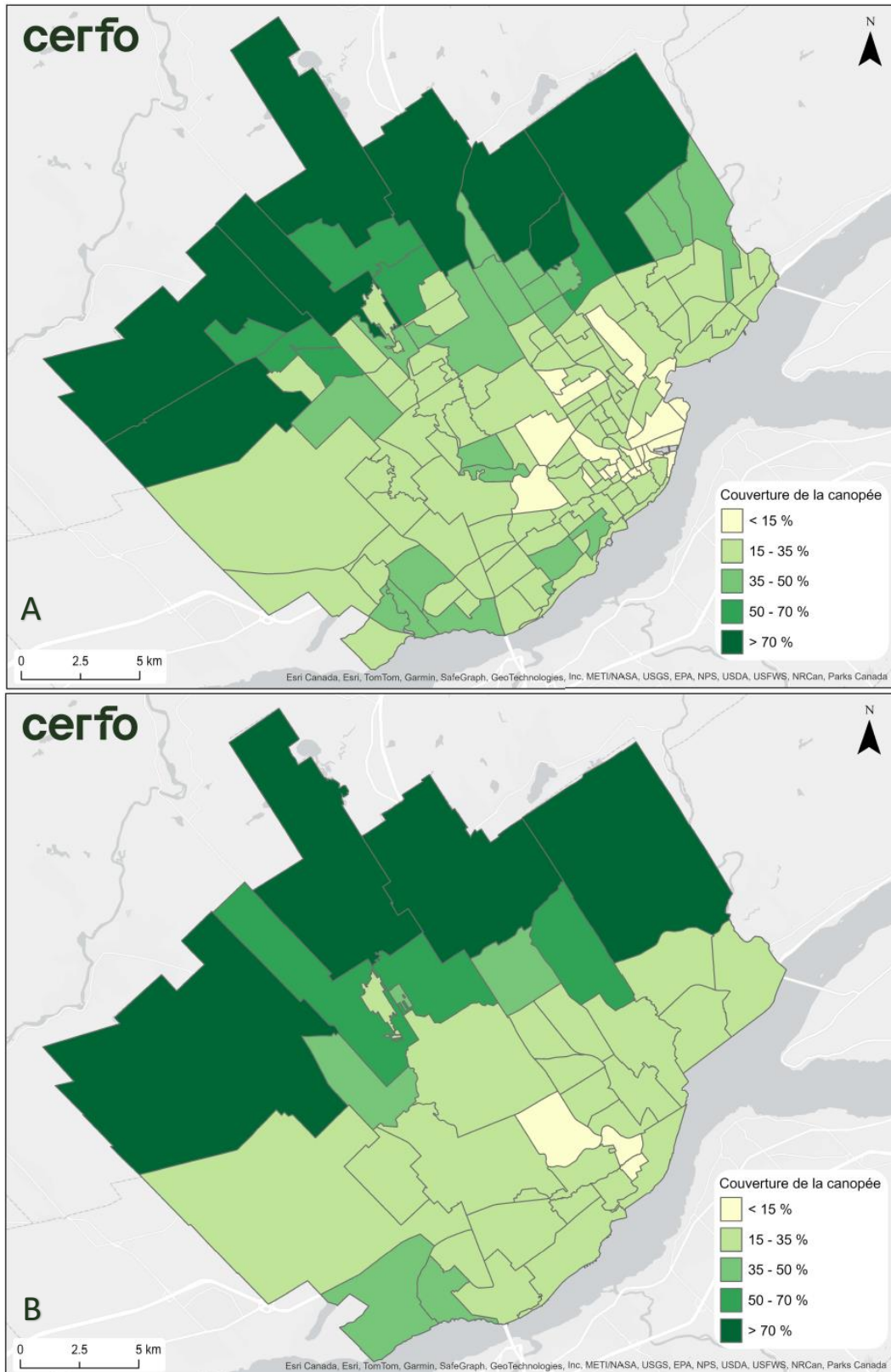


Figure 3 : Indice de canopée calculé par secteur de recensement (A) et par quartier (B) sur l'emprise de la ville de Québec.



Tableau 3 : Priorisation des zones de verdissement et définitions.

Indice de canopée	PM2.5	Catégorie	Définition
> 35 %	< 70e percentile	Canopée à conserver	La canopée est suffisante et la présence de particules fines est plus basse que dans le reste de la ville de Québec. Il faut conserver la canopée en place dans ces zones.
> 35 %	> 70e percentile	Autre besoin	La présence de particules fines est plus élevée que dans le reste de la ville de Québec. Cependant, l'indice de canopée atteint déjà le seuil visé. On note donc le besoin de recourir à d'autres approches pour améliorer la qualité de l'air à ces endroits, tout en conservant la canopée en place.
< 35 %	< 70e percentile	Verdissement secondaire	La canopée est insuffisante, cependant la présence de particules fines est plus basse que dans le reste de la ville de Québec. Il faut verdir ces zones, mais pour d'autres raisons que l'amélioration de la qualité de l'air.
< 35 %	> 70e percentile	Verdissement prioritaire	La canopée est insuffisante et la présence de particules fines est plus élevée que dans le reste de la ville de Québec. Ces zones sont à verdir en priorité.

À noter ici que la conservation de la canopée et le recours à d'autres solutions pour améliorer la qualité de l'air ne sont pas exclusifs aux catégories cartographiques établies, mais sont souhaitables sur l'ensemble du territoire si possible.



1.6. Comparaison avec des données satellitaires

Nous avons testé notre méthode de priorisation des zones de verdissement à partir de données de la qualité de l'air provenant d'une autre source que celle de nos capteurs, soit les données satellitaires de PM2.5 issues de l'université de Washington à Saint-Louis (*Washington University in St. Louis*). Les concentrations mondiales et régionales de PM2.5 fournies par cette université sont estimées à l'aide d'informations provenant de sources satellitaires, de simulations et de réseaux de surveillance des PM2.5 (Shen, Li, Van Donkelaar, *et al.* 2024, V6.GL.02.02). Les données utilisées sont des couches raster composées de pixels de 800 m x 800 m qui recouvrent l'intégralité du territoire à l'échelle planétaire et qui représentent des valeurs mensuelles et annuelles de PM2.5. Pour notre étude, nous avons retenu le raster annuel de 2022 qui est la couche la plus récente disponible. Cette couche raster a été traitée avec la même méthode de classement par percentiles que la couche raster issue de l'interpolation de nos données de capteurs (**Figure 5**). L'analyse a également été effectuée à l'échelle des secteurs de recensement et à l'échelle des quartiers.

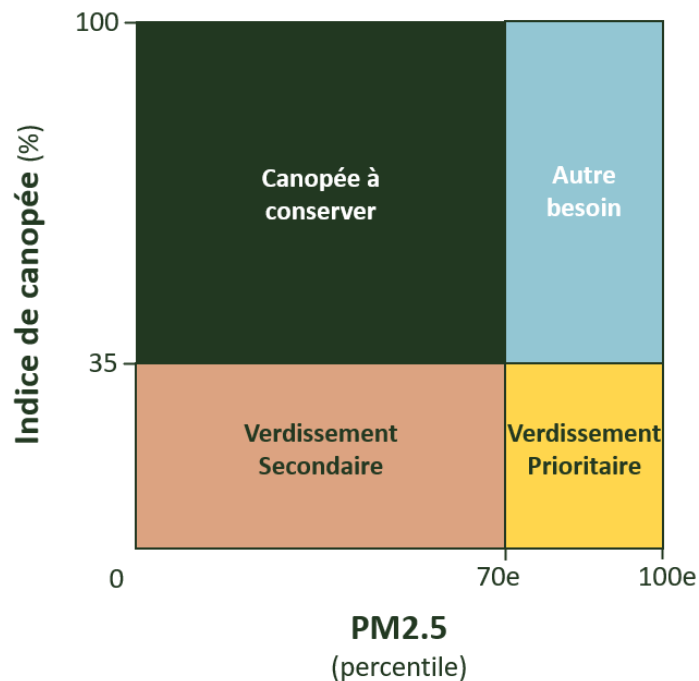


Figure 4 : Code couleur des zones de priorisation en verdissement à l'échelle de la ville de Québec.

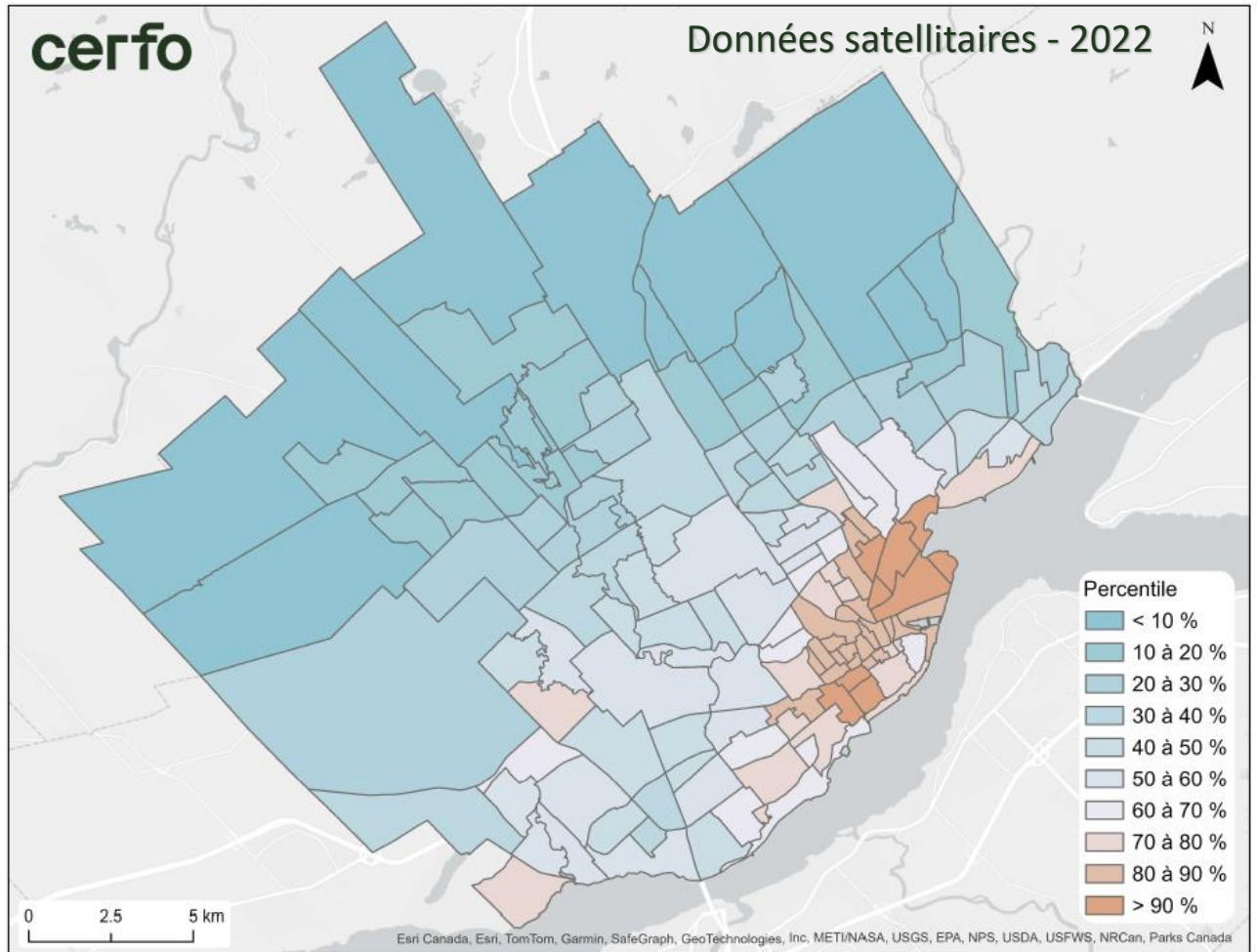


Figure 5 : Classement des secteurs de recensement par percentiles de PM2.5 annuelles moyennes satellitaires pour l'année 2022. (Données satellitaires de la *Washington University in Saint-Louis* - Shen, Li, Van Donkelaar, *et al.* 2024, V6.GL.02.02).



2. Résultats

2.1. Interpolation spatiale des PM2.5

Les résultats de l'interpolation spatiale des données de PM2.5 issues des capteurs de qualité de l'air sont visibles dans la **Figure 6**. Sur un total de 142 secteurs de recensement identifiés pour l'emprise de la ville de Québec, 43 présentent des valeurs de PM2.5 supérieures au 70e percentile (seuil utilisé pour notre classement). Cela signifie que l'air de ces 43 secteurs de recensement contient en moyenne plus de PM2.5 que 70 % des zones considérées dans l'étude.

Les secteurs quadrillés sur la carte de la **Figure 6** représentent ceux situés à l'extérieur de la limite de prise de données (les points de localisation des capteurs). Ces secteurs offrent donc une interpolation moins fiable que les données interpolées à l'intérieur de la zone d'échantillonnages. Un secteur (indiqué en gris sur la carte) n'a pas pu être classé, car il se trouvait trop loin de la limite de prise de données. Ce secteur se trouve cependant en plein dans la ceinture forestière de la ville de Québec et n'est pas dans une zone ciblée prioritaire pour la qualité de l'air.

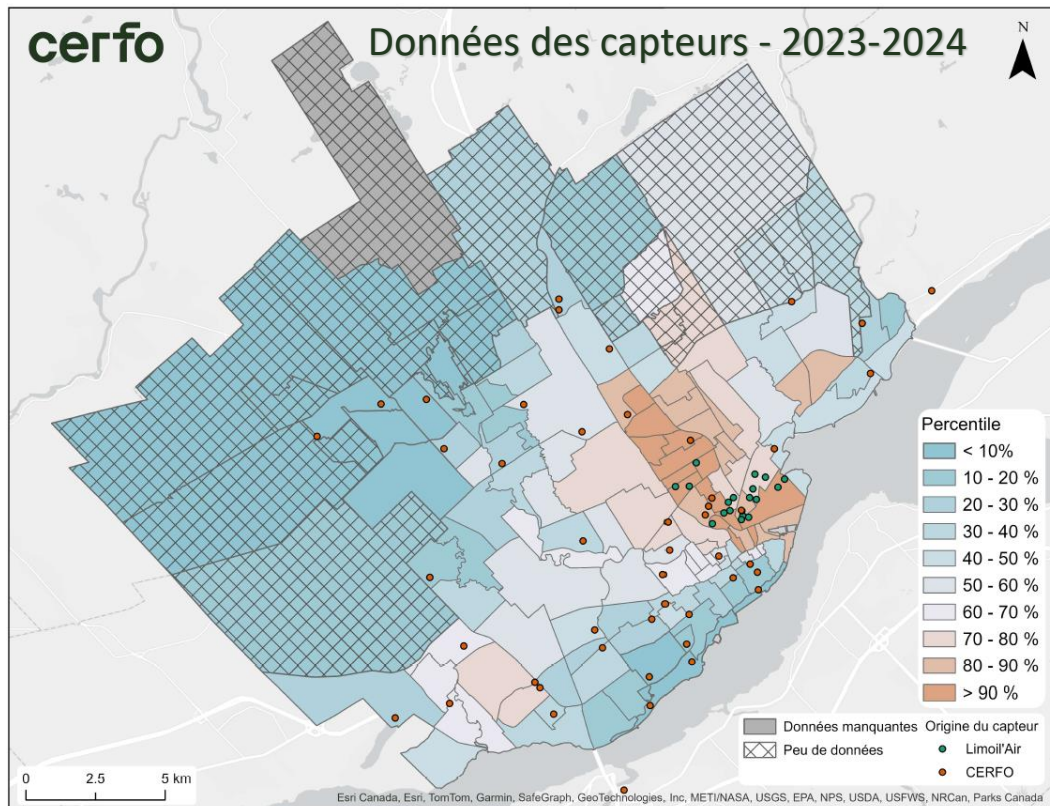


Figure 6 : Résultats de l'interpolation des données de PM2.5 annuelles moyennes issues des capteurs du CERFO et du réseau Limoiil'Air à l'échelle de la ville de Québec pour la période d'octobre 2023 à octobre 2024. Les PM2.5 ont été classées par percentiles sur l'ensemble de l'emprise de la ville de Québec.



2.2. Zones de verdissement prioritaires

2.2.1. Classement issu de l'interpolation des données de capteurs

Les différentes zones pour le verdissement ont été classées selon les critères mentionnés dans le paragraphe 1.5. Les résultats de cette classification sont disponibles dans le **Tableau 4** pour les secteurs de recensement et le **Tableau 5** pour les quartiers. Nos résultats montrent que 107 secteurs de recensement présentent des besoins de verdissement (**Tableau 4, Figure 7A**), dont 40 seraient prioritaires à cause de la présence importante de PM2.5 (relativement au reste de la ville de Québec). Ces secteurs sont situés dans le cœur de Québec. Les analyses par quartier (**Tableau 5, Figure 7B**) montrent que 11 quartiers sur 38 sont prioritaires pour le verdissement. La liste des quartiers prioritaires est indiquée dans le **Tableau 9**.

À noter : trois secteurs de recensement ainsi qu'un quartier sont classés « autre besoin ». Ils présentent des enjeux en termes de qualité de l'air, tout en ayant une canopée suffisante. D'autres moyens que le verdissement devraient être mis en œuvre pour réduire la présence de PM2.5 dans ces zones.

Tableau 4 : Résultat de la classification issue de l'interpolation des données de capteurs de qualité de l'air pour les secteurs de recensement.

<i>Données interpolées</i>	Secteurs	PM2.5 annuelles moyennes µg/m ³			Indice de canopée %		
		<i>N</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>
Autre besoin	3	7.2	7.3	7.3	36	45.8	64.5
Canopée à conserver	32	3.9	6.3	7.2	35	53.7	87
Verdissement prioritaire	40	7.2	7.6	8.4	4	19.9	31
Verdissement secondaire	67	5.1	6.8	7.2	10	24.1	34.5
Total	142	3.9	6.9	8.4	4	30.1	87

Tableau 5 : Résultat de la classification issue de l'interpolation des données de capteurs de qualité de l'air pour les quartiers ciblés.

<i>Données interpolées</i>	Quartiers	PM2.5 annuelles moyennes µg/m ³			Indice de canopée %		
		<i>N</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>
Autre besoin	1	7.3	7.3	7.3	57	57	57
Canopée à conserver	10	5	6.3	7.2	35.5	57.5	78
Verdissement prioritaire	11	7.2	7.5	8	13	20.3	30
Verdissement secondaire	16	6.1	6.7	7.1	13.5	24.8	37
Total	38	5	6.9	8	13	33	78

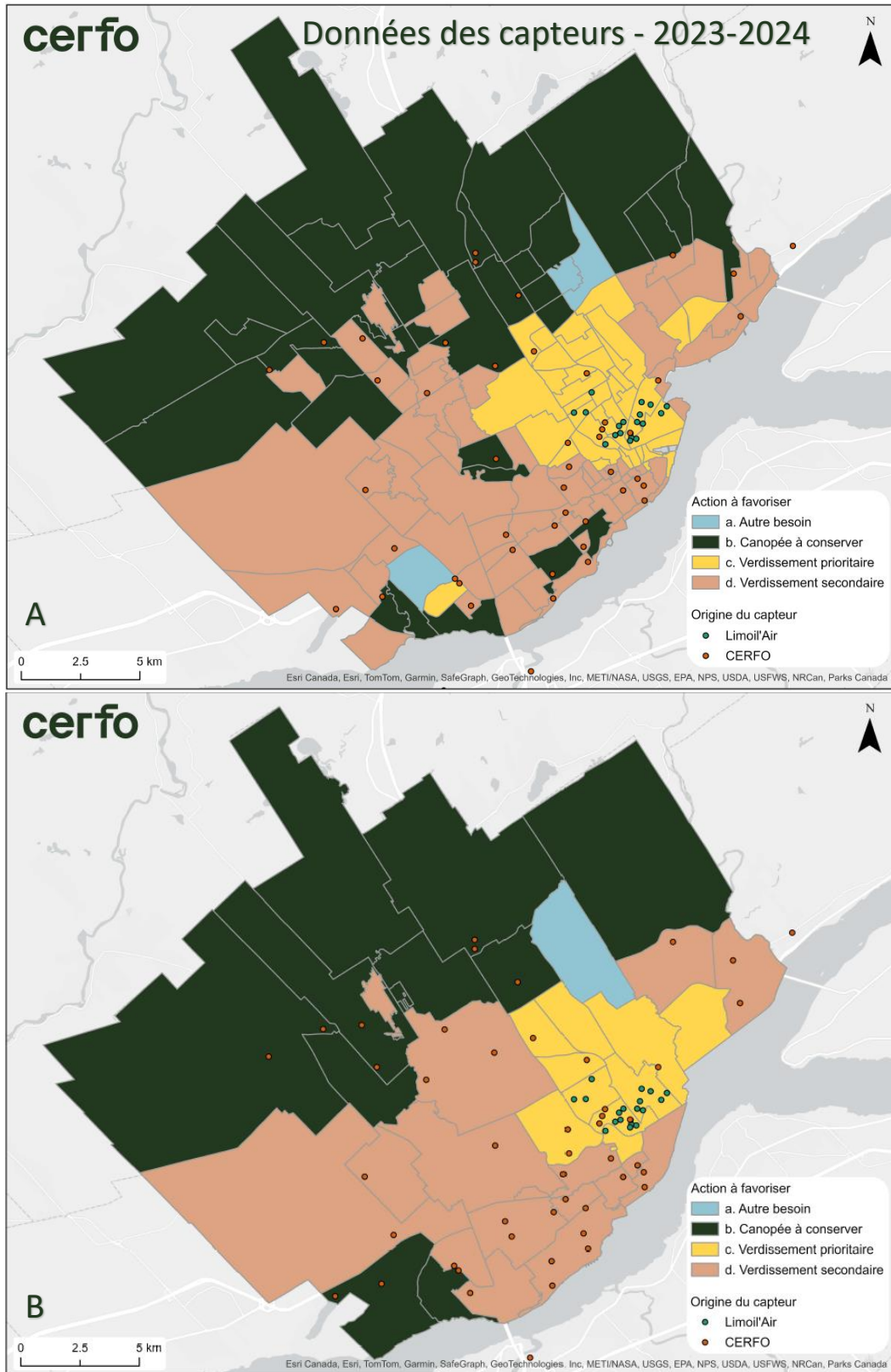


Figure 7 : Priorisation des besoins de verdissement sur l'emprise de la ville de Québec en fonction de la présence de canopée et la concentration de PM2.5 issues des données de capteurs de qualité de l'air installés par le CERFO et le réseau Limoiil'Air. A) Pour chaque secteur de recensement. B) Pour chaque quartier.



2.2.2. Classement issu des données satellitaires

Les données satellitaires ont été traitées de la même manière que nos données interpolées. Les résultats de cette classification sont disponibles dans le **Tableau 6** pour les secteurs de recensement et le **Tableau 7** pour les quartiers.

Dans le cas des données satellitaires, 42 secteurs de recensement (**Tableau 6, Figure 8A**) seraient prioritaires à cause de la présence importante de PM2.5 (relativement au reste de Québec). Les analyses par quartier (**Tableau 7, Figure 8B**) montrent que 12 quartiers sur 38 sont prioritaires pour le verdissement. La liste des quartiers prioritaires est indiquée dans le **Tableau 9**.

Tableau 6 : Résultat de la classification issue des données satellitaires pour les zones de recensement.

<i>Données satellitaires</i>	Zones	PM2.5 annuelles moyennes $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Indice de canopée %		
	<i>N</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>
Autre besoin	2	6,5	6,5	6,6	37,5	40,8	44
Maintien de la canopée	33	5,3	5,7	6,3	35	53,7	87
Verdissement prioritaire	42	6,5	6,7	7	4	18,5	33,5
Verdissement secondaire	65	5,6	6,1	6,5	13	25,2	34,5
Total	142	5,3	6,2	7	4	30,1	87

Tableau 7 : Résultat de la classification issue des données satellitaires pour les quartiers ciblés.

<i>Données satellitaires</i>	Quartiers	PM2.5 annuelles moyennes $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Indice de canopée %		
	<i>N</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>moy</i>	<i>max</i>
Autre besoin	0	-	-	-	-	-	-
Maintien de la canopée	12	5,4	5,7	6,3	35,5	55,8	78
Verdissement prioritaire	12	6,5	6,7	6,9	13,5	20,3	34,5
Verdissement secondaire	14	5,8	6,2	6,5	13	24,3	32,5
Total	38	5,4	6,2	6,9	13	33	78

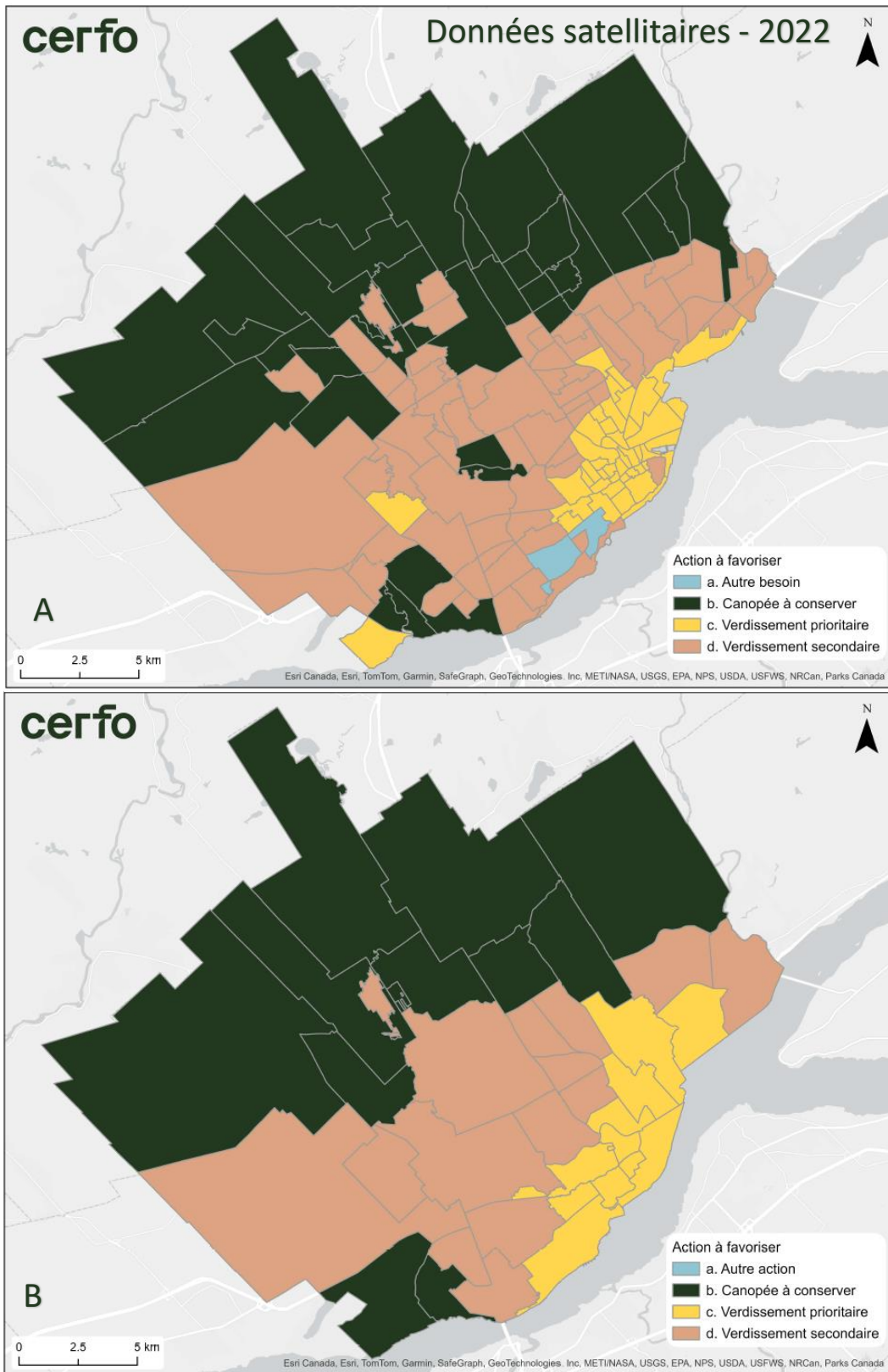


Figure 8 : Priorisation des besoins de verdissement sur l'emprise de la ville de Québec en fonction de la présence de canopée et la concentration de PM2.5 issues des données satellitaires.
A) Pour chaque secteur de recensement. B) Pour chaque quartier.



2.2.3. Comparaison entre les deux classements

Les données satellitaires brossent un portrait moins nuancé de la distribution de PM2.5 que les données issues de capteurs de qualité de l'air. En effet, la distribution de ces données variait entre 5,29 à 7,01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alors que cette distribution allait de 3,86 à 8,41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour nos données interpolées. C'est cette différence dans la distribution des données qui a justifié d'utiliser un seuil de classement basé sur les percentiles, plutôt qu'un seuil issu d'une valeur définie de PM2.5. La répartition des percentiles pour les deux sources de données est décrite dans le **Tableau 8**. L'utilisation des percentiles permet de classer les différentes zones d'études de façons relatives, sans que les différences de mesures de PM2.5 viennent biaiser les seuils utilisés.

Le classement des zones reste cependant assez différent d'une source de données de PM2.5 à l'autre. En comparant les deux sources, on n'obtient que 66,9 % de secteurs de recensement ayant le même classement, soit 95 secteurs sur 142, dont 20 sont classés prioritaires pour le verdissement. La liste des secteurs de recensement classés comme verdissement prioritaire par les deux sources de données est disponible en Annexe 3.

Parmi les quartiers ayant un indice de canopée inférieur à 35 %, donc ayant un besoin de verdissement, dix-sept quartiers ont été classés en « verdissement prioritaire » (PM2.5 supérieures au 70e percentile). Le classement des quartiers et zones de recensement diffère cependant selon les deux sources de données de PM2.5. À titre d'exemple, le **Tableau 9** liste les quartiers classés en verdissement prioritaire. Onze quartiers ont été sélectionnés via l'interpolation des données de capteurs de qualité de l'air, tandis que douze quartiers ont été sélectionnés via les données satellitaires. Seuls 6 quartiers se croisent entre les deux sources de données. Il s'agit des quartiers Saint-Roch, Vieux-Moulin, Vieux-Limoilou, Maizerets, Vieux-Bourg et le secteur des Ursulines.



Tableau 8 : Répartition des percentiles en fonction des deux sources de données de PM2.5.

Percentile	PM2.5 annuelles moyennes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Interpolation	Satellite
0	3,86	5,29
10	$\leq 6,25$	$\leq 5,48$
20	$\leq 6,55$	$\leq 5,70$
30	$\leq 6,76$	$\leq 5,93$
40	$\leq 6,88$	$\leq 6,11$
50	$\leq 6,94$	$\leq 6,26$
60	$\leq 7,08$	$\leq 6,36$
70	$\leq 7,21$	$\leq 6,48$
80	$\leq 7,45$	$\leq 6,62$
90	$\leq 7,63$	$\leq 6,76$
100	8,41	7,01

Tableau 9 : Comparaison des quartiers classés en zone prioritaire de verdissement selon les deux sources de données de PM2.5 moyennes annuelles. Les quartiers ayant été classés prioritaires pour le verdissement par les deux sources de données sont marqués en gras.

Verdissement prioritaire Quartier	PM2.5 moyennes annuelles		Indice de canopée (%)
	Interpolation	Satellite	
Vanier	X		13
Saint-Jean-Baptiste		X	13,5
Saint-Roch	X	X	14,5
Vieux-Moulin	X	X	15
Saint-Sauveur		X	16
Vieux-Québec—Cap-Blanc—Colline parlementaire		X	16
Vieux-Limoilou	X	X	17
Quartier 4-6	X		17,5
Maizerets	X	X	19
Vieux-Bourg	X	X	21,5
Lairet	X		22
Montcalm		X	25
Ursulines	X	X	25
Saint-Sacrement		X	26,5
Jésuites	X		29
Quartier 4-5	X		30
Sillery		X	34,5
Total de 17 quartiers	11 quartiers	12 quartiers	



3. Discussion et recommandations

Ce projet a permis de récolter un an de données sur la qualité de l'air sur l'emprise de la ville de Québec, afin de fournir une carte de la concentration de PM2.5 dans le but de prioriser les secteurs à verdir. Ce projet a également permis de démontrer qu'il était possible d'étendre le type de capteurs déployés dans le projet Limoil'Air à un plus vaste territoire, grâce à l'établissement d'un réseau de capteurs maillés se relayant les informations via la technologie LoRa.

Deux éléments viennent relativiser les avancées réalisées dans ce projet. Tout d'abord, il n'a pas été possible de corriger les données de PM2.5 relevées en fonction de l'humidité de l'air. Il est reconnu que le type de capteurs employé peut être sensible au taux d'humidité dans l'air (Barkjohn, Gantt, et Clements 2021). Malgré la présence de capteurs d'humidité (BME) dans les capteurs employés dans cette étude, la fiabilité des données recueillies n'était pas suffisante pour qu'on puisse les utiliser (Annexe 2). Bien qu'il soit possible d'intégrer les données d'humidité des stations d'environnement Canada, l'étendue de ce réseau de stations ne couvre pas l'ensemble de nos sites étudiés. Puisque la méthode développée ici vise à comparer la qualité de l'air sur une base relative, nous avons décidé d'employer les données brutes issues des capteurs. Ceci limite toutefois la capacité de comparer nos valeurs de PM2.5 avec d'autres sources de données.

La seconde limite de l'étude concerne l'échantillonnage de sites avec un indice de canopée suffisant. Lors de la sélection des sites (Annexe 1), le quadrant 1 (équivalent à « autre besoin » dans notre classement) était sous-représenté. Ces sites concernent des lieux avec une forte canopée, mais également une forte présence de particules fines. Pour pallier cette situation, 15 capteurs munis de panneaux solaires ont été déployés dans ces secteurs sous-représentés. Toutefois, en raison de problèmes techniques, seuls quatre capteurs solaires ont pu fournir des données fiables. Par conséquent, l'échantillonnage effectué peut ne pas représenter entièrement les différents types de sites relevés sur le territoire de la ville de Québec, notamment les sites classés « autre besoin ».

Classement des zones de priorisation

Le classement des zones de priorisation semble concorder partiellement selon la source de données de concentration de PM2.5 utilisée. Parmi les onze quartiers prioritaires identifiés par les capteurs connectés, six ont également été jugés prioritaires à partir des données satellitaires. Ces quartiers sont ceux de Maizerets, St-Roch, Vieux-Bourg, Vieux-Limoilou, Vieux-Moulin et le secteur des Ursulines. Les autres quartiers prioritaires identifiés par les données des capteurs sont situés à l'ouest de Limoilou jusqu'à Vanier ainsi qu'au nord vers le quartier des Jésuites. Cette situation contraste avec les quartiers prioritaires relevés par les données satellitaires qui s'étendent plutôt au sud-ouest de Limoilou jusqu'à Sillery. Puisque les données de canopée utilisées pour ces deux classements étaient les mêmes, ces résultats confirment que la source des données de la qualité de l'air est importante dans le classement final des secteurs à prioriser.

En comparant visuellement ces résultats avec ceux obtenus par les capteurs mobiles de l'INSPQ (Buteau, Smargiassi, et Goupil-Sormany 2023; Clark *et al.* 2024), il est possible de voir d'autres variations entre les sources de données. Tout



comme pour les données satellitaires, cette étude a relevé de fortes concentrations de PM_{2.5} dans le Vieux-Québec jusqu'à Montcalm et Sillery (**Figure 9**).

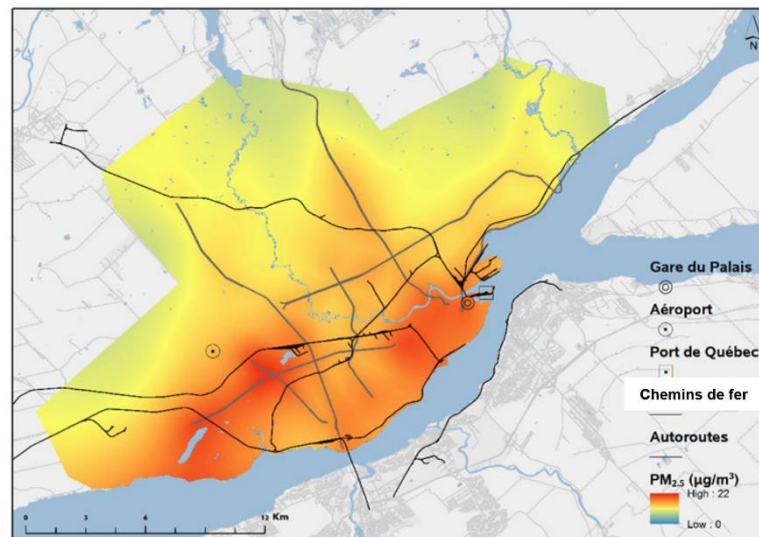


Figure 9 : Variabilité spatiale des concentrations moyennes annuelles de PM_{2.5} à Québec, modélisées à partir de données issues de l'échantillonnage mobile pour l'ensemble de la zone d'étude élargie (données prises de juin 2019 à juin 2020 - carte extraite du rapport de Buteau, Smargiassi, et Goupil-Sormany - INSPQ 2023).

Toutefois, les arrondissements de La Cité-Limoilou, Beauport et Charlesbourg, quoique présentant certains enjeux locaux, semblaient moins prioritaires, comparativement à ceux situés près de Cap-Rouge. Cette dernière observation soulève un point important : alors que l'attention est souvent portée vers les secteurs de l'arrondissement de La Cité-Limoilou, les secteurs au sud-ouest de la ville de Québec, près de la tête des ponts, semblent également présenter certaines problématiques. Les priorisations des zones de verdissement, à partir des données satellitaires et de notre réseau de capteurs, ont également identifié certains secteurs de recensement prioritaires dans ces secteurs. Toutefois, la concordance entre les sources de données semble faible. Un inventaire exhaustif avec une densité élevée de capteurs devrait donc être effectué dans ces secteurs de Québec.

Les disparités observées entre les sources de données peuvent être causées par trois facteurs : les approches employées pour mesurer la qualité de l'air, les analyses effectuées afin d'extrapoler les valeurs à l'ensemble du territoire et l'année de prise de données. Les données de l'INSPQ ont été obtenues par des capteurs fixés sur une voiture électrique (mobile), cette dernière ayant couvert principalement les axes routiers de la ville de Québec. À contrario, notre approche impliquait des capteurs fixes installés majoritairement chez des citoyens, tandis que l'approche satellitaire permettait de couvrir l'entièreté du territoire étudié, mais à un niveau de résolution relativement faible. Du côté des analyses, l'INSPQ a employé un modèle se basant sur l'utilisation du territoire (*land-use regression*) pour attribuer des valeurs de PM_{2.5} à l'ensemble de la ville, alors que de notre côté, nous avons employé une interpolation spatiale se basant essentiellement sur la distance entre les capteurs. Les données de l'INSPQ couvrent la période de juin 2019 à mars 2020. Leurs données sont issues d'un échantillonnage mobile réalisé une fois par semaine



entre 8 h et 10 h du matin, le long de trois routes prédéfinies, d'une durée de 2 h chacune, et réparties sur le territoire de la ville. Les données satellitaires que nous utilisons sont quant à elles issues de 2022, alors que notre échantillonnage par capteurs s'est déroulé de septembre 2023 à septembre 2024.

Ces différents facteurs peuvent expliquer le manque de concordance entre les différentes sources de données pour certains secteurs de la ville. Il est aussi possible que notre inventaire, ciblant principalement les résidences privées, ait omis une part de la pollution associée au milieu routier.

Puisque la méthode de quantification des PM2.5 influence la priorisation des zones à verdir, il importe de baser nos choix de priorisation sur plusieurs sources de données. Dans le cas de la ville de Québec, il semblerait justifié de prioriser les six quartiers identifiés par les données satellitaires et celles des capteurs, soit : Maizerets, Saint-Roch, Vieux-Bourg, Vieux-Limoilou, Vieux-Moulin et le secteur des Ursulines.

Comparaison avec d'autres priorisations pour le verdissement

En 2022, le CERFO a réalisé une étude de priorisation des secteurs à verdir pour le compte de l'Association forestière des deux rives (AF2R) en se basant sur la présence d'îlots de chaleur, la couverture de la canopée, la perméabilité des sols et l'indice combiné de défavorisation matérielle et sociale de la population (Budei *et al.* 2023). Tout comme les deux classements effectués dans ce rapport, cette approche a également identifié des secteurs prioritaires pour le verdissement dans les quartiers Maizerets, Saint-Roch, Vieux-Bourg et Vieux-Limoilou. Toutefois, il est intéressant de constater que les quartiers Lairet et Vanier étaient visés comme prioritaires par cette approche, ce qui a été relevé dans nos données de capteurs de qualité de l'air, mais pas par les données satellitaires. Parallèlement, les quartiers Saint-Sauveur et Saint-Sacrement avaient une forte proportion de sites prioritaires pour le verdissement par l'approche réalisée pour l'AF2R. Ces mêmes quartiers ont été identifiés comme prioritaires par les données satellitaires, mais pas par nos données de capteurs de qualité de l'air.

Les secteurs de Montcalm et Sillery étaient en majorité non prioritaires selon l'approche réalisée pour l'AF2R, alors qu'ils ont été identifiés comme prioritaires par les données satellitaires. Enfin, le secteur de Charlesbourg comptait peu de sites prioritaires dans l'approche réalisée pour l'AF2R, tout comme les données satellitaires, alors que les données de nos capteurs y ont identifié certains secteurs prioritaires.

Ces résultats démontrent donc que les données de qualité de l'air ajoutent une couche d'information importante pour la priorisation des sites de verdissement. De plus, bien que différentes sources de données montrent une certaine disparité entre les sites à prioriser, nous pouvons croiser les résultats pour identifier les sites qui ressortent le plus souvent comme prioritaires.



Conclusion

Ce projet a démontré qu'il était possible de tirer profit de la technologie de l'Internet des objets (IoT) pour cartographier la qualité de l'air à fine échelle dans le but d'orienter les initiatives de verdissement. Ces initiatives seraient les plus appropriées dans les quartiers et secteurs où l'on retrouve à la fois les plus fortes concentrations de PM2.5 et une faible couverture de la canopée. Cette information sur la qualité de l'air pourrait s'ajouter à celle fournie par les îlots de chaleur, les zones d'accumulation d'eau lors de fortes précipitations et la vulnérabilité de la population, afin de cibler précisément les endroits où prioriser des interventions.

Il a cependant été démontré que la priorisation de sites de verdissement pouvait fortement dépendre de la source des données de qualité de l'air (capteurs fixes, mobiles ou satellitaires, méthodes d'analyses ou années de mesures), de sorte qu'il serait avisé de se baser sur plusieurs sources de données, lorsque disponibles. Bien que notre réseau de capteurs nous ait permis d'acquérir des données fiables pendant un an, cette avenue peut s'avérer lourde en termes d'entretien du matériel déployé. De plus, la possibilité de déployer des capteurs ailleurs que chez des citoyens participants peut être limitée par l'autonomie des capteurs, que ce soit pour l'alimentation électrique comme pour l'envoi des données. Par conséquent, il est encore difficile de couvrir tous les types d'occupation d'un territoire urbain. En l'absence de possibilités d'installation d'un réseau de capteurs extensif, les données satellitaires utilisées dans ce rapport pourraient être un premier pas intéressant à utiliser, bien que situées à une échelle spatiale plus large. Il est également important de noter que nous n'avons traité que des données relatives à la concentration de PM2.5. Il serait intéressant d'intégrer les données relatives à d'autres polluants (ex : l'ozone et les oxydes d'azote) dans une approche similaire à celle utilisée ici.

Ce projet a permis d'identifier les quartiers de Maizerets, Saint-Roch, Vieux-Bourg, Vieux-Limoilou, Vieux-Moulin et le secteur des Ursulines comme prioritaires pour un verdissement ayant pour but l'amélioration de la qualité de l'air. Ces secteurs ont été identifiés à la fois par les données de notre réseau de capteurs et par les données satellitaires. Il est important de planifier adéquatement les projets de verdissement dans ces secteurs, afin de favoriser à la fois la déposition sèche des particules fines sur la végétation, mais également pour favoriser l'aération de ces quartiers. En effet, malgré leur effet souvent bénéfique, les arbres en bordure de rue peuvent emprisonner les particules fines dans certaines situations (ex. : effet canyon décrit dans [Janhäll 2015]). Il serait donc intéressant de modéliser l'effet anticipé de projets de verdissement sur la distribution des particules fines dans ces quartiers, et ce, avant de passer à l'action avec le verdissement. Le choix des essences peut également s'avérer important, afin de choisir des essences avec des caractéristiques pouvant maximiser la rétention des particules fines (Gauthray-Guyénet *et al.* 2022; 2024).

Enfin, le secteur près de la tête des ponts (Sainte-Foy et Cap-Rouge) semble également présenter des enjeux de qualité de l'air, mais les lieux spécifiques à cibler varient selon la source de données. Il serait donc pertinent de mieux étudier la variation spatiale et temporelle de la qualité de l'air dans ces secteurs.



Références

- Baillargeon, Sophie. 2005. « Le krigeage: revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations ».
- Barkjohn, Karoline K., Brett Gantt, et Andrea L. Clements. 2021. « Development and Application of a United States Wide Correction for PM2.5 Data Collected with the PurpleAir Sensor ». *Atmospheric Measurement Techniques* 4 (6). <https://doi.org/10.5194/amt-14-4617-2021>.
- Brière, Jean-François. 2015. « Effets sur l'air ambiant des émissions de l'incinérateur de la ville de Québec : évaluation par modélisation de la dispersion atmosphérique - (2e édition) ». Québec. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Budei, Brindusa Cristina, Vincent Gauthray-Guyénet, Emmanuelle Boulfroy, et Mathieu Varin. 2023. « Priorisation des sites de plantation pour le verdissement des deux rives ». 23-02. Sainte-Foy, Qc (Canada): CERFO.
- Busque, Daniel. 2022. « Variations spatiotemporelles et saisonnalité des concentrations de particules fines à Québec : 2010-2018 ». Québec: Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement.
- Buteau, Stéphane, Audrey Smargiassi, et Isabelle Goupil-Sormany. 2023a. « Portrait de la pollution de l'air à Québec et de certains de ses impacts sur la santé des résidents des territoires des CLSC de Limoilou-Vanier et de Québec-Basse-Ville ». Rapport de recherche ISBN 978-2-550-94188-0. Gouvernement du Québec. INSPQ.
- Chen, Xiaoping, Tingting Pei, Zhixiang Zhou, Mingjun Teng, Liang He, Man Luo, et Xinxing Liu. 2015. « Efficiency Differences of Roadside Greenbelts with Three Configurations in Removing Coarse Particles (PM10): A Street Scale Investigation in Wuhan, China ». *Urban Forestry & Urban Greening* 14 (2): 354-60. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.02.013>.
- Clark, Sierra Nicole, Ryan Kulka, Stephane Buteau, Eric Lavigne, Joyce J.Y. Zhang, Christian Riel-Roberge, Audrey Smargiassi, Scott Weichenthal, et Keith Van Ryswyk. 2024. « High-Resolution Spatial and Spatiotemporal Modelling of Air Pollution Using Fixed Site and Mobile Monitoring in a Canadian City ». *Environmental Pollution* 356 (septembre):124353. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124353>.
- Direction de santé publique. 2023a. « Faits saillants et recommandations du projet « Mon environnement, ma santé ». » Mon environnement, ma santé. Québec: Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Capitale-Nationale.
- Direction de santé publique. 2023b. « Portrait des particules en suspension et des métaux dans l'air des quartiers Limoilou, Vanier et Basse-Ville ». Mon environnement, ma santé. Québec: Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux de la Capitale-Nationale.
- Direction régionale de santé publique du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de Montréal. 2017. « Avis concernant les polluants le long des autoroutes et recommandations sur les usages aux abords du complexe turcot ». Montréal: Service Environnement urbain et saines habitudes de vie.
- Division de la Prévention et du contrôle environnemental. 2023. « Plan d'action 2023-2027 pour une saine qualité de l'air extérieur ». Ville de Québec. <https://www.ville.quebec.qc.ca/apropos/planification-orientations/environnement/air/index.aspx>.
- Environnement et Changement climatique Canada. 2018. « Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Qualité de l'air ». Gatineau (QC), Canada.



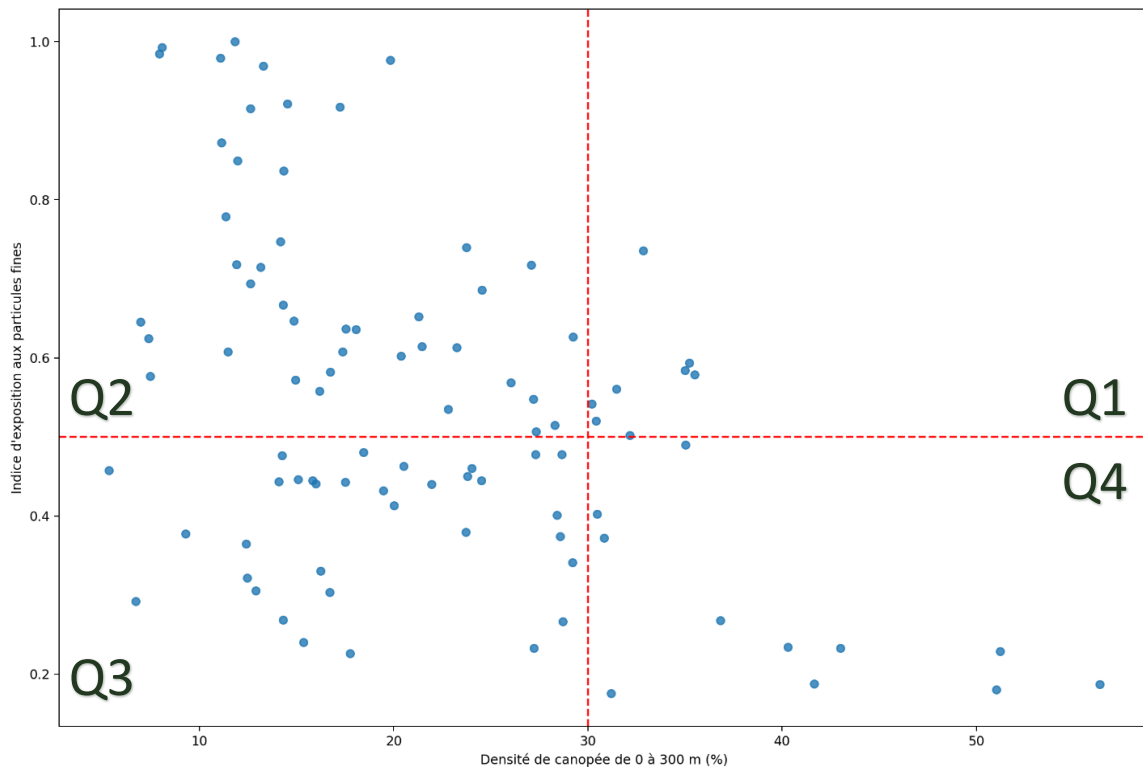
- Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre de Ressources naturelles Canada. 2021. « Carte interactive des indicateurs canadiens de durabilité l'environnement ». 2021. https://carte-indicateurs.canada.ca/App/CESI_ICDE?keys=AirAmbient_AvgPM&GoCTemplateCulture=fr-CA.
- Escobedo, Francisco J., et David J. Nowak. 2009. « Spatial Heterogeneity and Air Pollution Removal by an Urban Forest ». *Landscape and Urban Planning* 90 (3): 102-10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.021>.
- ESRI. 2024. « ArcGIS Pro ».
- Gauthray-Guyénet, Vincent, Emmanuelle Boulfroy, Samuel Royer-Tardif, Hubert Fortin, et Mathieu Béland. 2024. « Efficacité du verdissement face à la captation de polluants atmosphériques dans le contexte des changements climatiques et de présence d'îlots de chaleur - Analyse des études de cas ». 2023-20. Sainte-Foy, Qc (Canada).
- Gauthray-Guyénet, Vincent, Samuel Royer-Tardif, Emmanuelle Boulfroy, Étienne Yusufu Kachaka, et David Grenier-Héon. 2022. « Impact des arbres en milieu urbain sur la qualité de l'air, la séquestration du carbone et la captation des eaux de pluie ». 2022-33. Québec: Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO).
- Gouvernement du Canada, Statistique Canada. 2021. « Dictionnaire, Recensement de la population, 2021 – Secteur de recensement (SR) ». 17 novembre 2021. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2021/ref/dict/az/definition-fra.cfm?ID=geo013>.
- Groupe de travail sur les contaminants atmosphériques. 2023a. « Rapport sur le portrait de la qualité de l'air du secteur Limoilou-Basse-Ville, proposition de mesures d'atténuation et recommandations ».
- INSPQ. 2023. « Fiche synthèse Concentration moyenne annuelle de particules fines (PM_{2,5}) ».
- Irga, P. J., M. D. Burchett, et F. R. Torpy. 2015. « Does Urban Forestry Have a Quantitative Effect on Ambient Air Quality in an Urban Environment? » *Atmospheric Environment* 120 (novembre):173-81. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.050>.
- Janhäll, Sara. 2015. « Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion ». *Atmospheric Environment* 105 (mars):130-37. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>.
- Karner, Alex A., Douglas S. Eisinger, et Deb A. Niemeier. 2010. « Near-Roadway Air Quality: Synthesizing the Findings from Real-World Data ». *Environmental Science & Technology* 44 (14): 5334-44. <https://doi.org/10.1021/es100008x>.
- Konijnendijk, Cecil. 2021. « The 3-30-300 Rule for Urban Forestry and Greener Cities ». *Biophilic Cities Journal* 4 (2).
- MELCCFP. 2023. *Programme de prévention et de réduction des risques liés aux changements climatiques par le verdissement. Cadre normatif 2023*. Québec: Environnement, lutte contre les changements climatiques, faune et parcs Québec.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). 2021. « Bilan de la qualité de l'air au Québec 2021 ». Québec: Gouvernement du Québec. Bibliothèque et Archives nationales du Québec. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/air/rapports-qualite-air.htm>.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). 2022. « Revue 2022 de la qualité de l'air au Québec ». Gouvernement du Québec.



- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). 2024. « Rapport d'avancement 2022 par rapport aux normes canadiennes de la qualité de l'air ambiant ». ISBN 978-2-550-96708-8. Gouvernement du Québec. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Nowak, David J., Satoshi Hirabayashi, Marlene Doyle, Mark McGovern, et Jon Pasher. 2018. « Air Pollution Removal by Urban Forests in Canada and Its Effect on Air Quality and Human Health ». *Urban Forestry & Urban Greening*, Wild urban ecosystems: challenges and opportunities for urban development, 29 (janvier):40-48. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.019>.
- PurpleAir. 2024. « Real-Time Air Quality Monitoring by PurpleAir ». PurpleAir. 2024. <https://www2.purpleair.com/>.
- RevolvAir.org. 2021. « Limoil'Air : projet propulsé par RevolvAir ». *RevolvAir.org* (blog). 14 décembre 2021. <https://revolvair.org/limoilair-projet-propulse-par-revolvair/>.
- Santé Canada. 2021a. « Les impacts sur la santé de la pollution de l'air au Canada. Estimation des décès prématurés et des effets non mortels. » 978-0-660-37332-4.
- Santé Canada. 2021b. « Particules fines ». 14 avril 2021. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/qualite-air/contaminants-air-interieur/particules-fines.html>.
- Shen, Siyuan, Chi Li, Aaron Van Donkelaar, Nathan Jacobs, Chenguang Wang, et Randall V. Martin. 2024. « Enhancing Global Estimation of Fine Particulate Matter Concentrations by Including Geophysical *a Priori* Information in Deep Learning ». *ACS ES&T Air* 1 (5): 332-45. <https://doi.org/10.1021/acsestair.3c00054>.
- Tong, Zheming, Thomas H. Whitlow, Patrick F. MacRae, Andrew J. Landers, et Yoshiki Harada. 2015. « Quantifying the Effect of Vegetation on Near-Road Air Quality Using Brief Campaigns ». *Environmental Pollution* 201 (juin):141-49. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.026>.
- Université Laval. 2024. « Un projet de recherche précise les données Limoil'air ». 30 avril 2024. https://www.ffgg.ulaval.ca/detail-actualite?id_actua=2953&src=ffgg.
- Van Donkelaar, Aaron, Melanie S Hammer, Liam Bindle, Michael Brauer, Jeffery R Brook, Michael J Garay, N Christina Hsu, Olga V Kalashnikova, Ralph A Kahn, et Colin Lee. 2021. « Monthly global estimates of fine particulate matter and their uncertainty ». *Environmental Science & Technology* 55 (22): 15287-300.
- Varin, Mathieu, Guillaume Sena, Marc-Antoine Genest, Camille Armellin, et Anne-Marie Dubois. 2020. « Note technique : Cartographie de l'indice de canopée 2020 de la ville de Québec par une classification orientée-objet ». Note technique 2020-02. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO).
- Verret, Thomas. 2023. « Limoil'air : la concentration de particules fines affecte tout Limoilou ». Monlimoilou. 29 septembre 2023. <https://monlimoilou.com/2023/limoilair-la-concentration-de-particules-fines-affecte-tout-limoilou/>.
- Ville de Québec. 2015. *Vision de l'arbre 2015-2025*.
- Ville de Québec. 2020. « Place aux arbres. Bilan 2015-2020 / Chantiers 2021-2025 de la vision de l'arbre ».
- Wood, Sylvia, Jérôme Dupras, Sylvain Delagrangé, Anne Voyer, Nancy Gélinas, et Laurent Da Silva. 2018. « La valeur économique des services écosystémiques rendus par les arbres minipaux de la Ville de Québec ». *Ouranos*.
- Wu, Jiansheng, Keyu Luo, Yi Wang, et Zhenyu Wang. 2021. « Urban Road Greenbelt Configuration: The Perspective of PM_{2.5} Removal and Air Quality Regulation ». *Environment International* 157 (décembre):106786. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106786>.

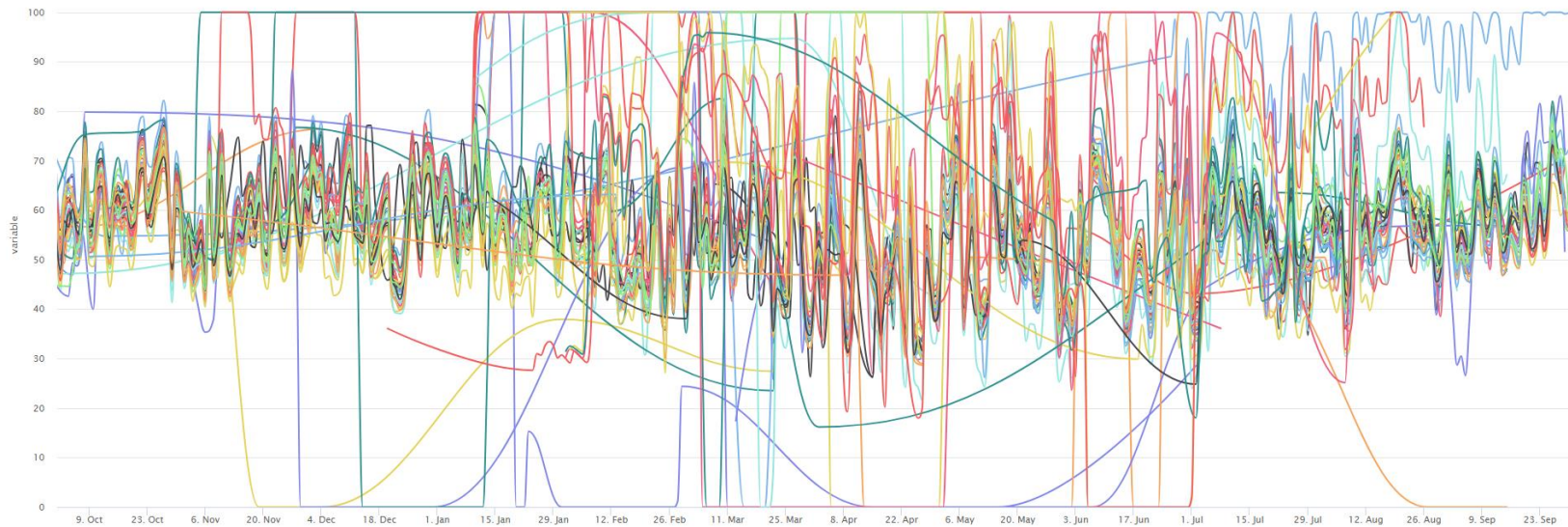


Annexe 1 - Distribution des citoyens volontaires dans les quadrants (pollution vs canopée)





Annexe 2 - Données d'humidité relative (%) des capteurs de qualité de l'air



Les BME utilisés dans nos capteurs, pour le suivi de l'humidité relative (%), ont causé certains problèmes dans notre acquisition de données. Ce graphique représente les données d'humidité relative mesurées sur les capteurs retenus pour l'interpolation. De nombreux capteurs se retrouvent avec une humidité relative bloquée à 100 % sur une longue période. Les BME ont également présenté une durée de vie courte, de nombreuses réparations ayant dû être effectuées, causant des trous dans la prise de données. Additionnellement, certains BME présentaient des données « erratiques » ou des dérives de l'humidité relative sur une longue période.



Annexe 3 - Secteurs de recensement classés prioritaires pour les initiatives de verdissement

Cette liste représente les secteurs de recensement qui ont été classés prioritaires pour les initiatives de verdissement, car leur canopée est inférieure à l'objectif de 35 % désiré par la Ville de Québec et que la présence de PM2.5 est supérieure au 70e percentile des deux sources de données (capteurs et satellitaire). Les secteurs ont été classés par indice de canopée (%) croissant.

SRIDU	IDUGD	SRNOM	Indice de canopée (%)	Moyenne annuelle de PM2.5 (µg/m³)	
				Capteurs	Satellite
4210025.00	2021S05074210025.00	0025.00	4	7.5	6.6
4210028.00	2021S05074210028.00	0028.00	6	7.9	7
4210024.00	2021S05074210024.00	0024.00	10	7.6	6.7
4210023.00	2021S05074210023.00	0023.00	11	7.8	6.7
4210027.00	2021S05074210027.00	0027.00	11	7.5	6.9
4210017.00	2021S05074210017.00	0017.00	11.5	7.2	6.5
4210022.00	2021S05074210022.00	0022.00	14	7.6	6.7
4210032.00	2021S05074210032.00	0032.00	14	7.4	6.6
4210031.00	2021S05074210031.00	0031.00	15	7.6	6.6
4210021.00	2021S05074210021.00	0021.00	16	7.7	6.7
4210010.00	2021S05074210010.00	0010.00	17.5	7.3	6.7
4210029.00	2021S05074210029.00	0029.00	19.5	8.1	6.7
4210035.00	2021S05074210035.00	0035.00	19.5	7.9	6.5
4210037.00	2021S05074210037.00	0037.00	21	7.3	6.9
4210273.01	2021S05074210273.01	0273.01	22.5	7.5	6.6
4210030.00	2021S05074210030.00	0030.00	23	7.9	6.6
4210038.01	2021S05074210038.01	0038.01	24	7.6	6.8
4210038.02	2021S05074210038.02	0038.02	25	7.6	6.7
4210026.00	2021S05074210026.00	0026.00	25.5	7.3	7
4210036.00	2021S05074210036.00	0036.00	30.5	7.3	6.7

Définitions des termes :

SRIDU	Désigne particulièrement un secteur de recensement dans une région métropolitaine de recensement/agglomération de recensement (composé du code d'identification unique à 3 chiffres de la région métropolitaine de recensement/l'agglomération de recensement, suivi du nom du secteur de recensement à 7,2 caractères).
IDUGD	Identificateur unique des géographies de diffusion
SRNOM	Chaque secteur de recensement se voit attribuer un « nom » numérique à 7,2 caractères (incluant les zéros d'attaque, le point décimal et les zéros à droite).



cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

CERFO.QC.CA

2440, chemin Sainte-Foy
Québec (Québec) G1V 1T2

Téléphone : (418) 659-4225
Télécopieur : (418) 659-4226
Courriel : info@cerfo.qc.ca