



cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTÉRIE

NOTE TECHNIQUE NO 2024-03

FÉVRIER 2024



Cartographie de la canopée des six régions métropolitaines de recensement du Québec

2. Pourquoi une cartographie de la canopée?
3. Quelle carte a été produite et comment y accéder?
5. Exemples d'utilisation de la carte et ses limites
9. Annexe: Selon quelle méthodologie la carte a-t-elle été produite?
14. Principales références

ÉQUIPE DE RÉALISATION

Brindusa Cristina Budei, Ph. D.

Batistin Bour, M. Sc.

Marc-Antoine Genest, M. Sc.

Mathieu Varin, M. Sc.

Emmanuelle Boulfroy, M. Sc.

Qu'est-ce qu'une canopée?

La canopée se définit comme la projection au sol de la cime (ou couronne) des arbres (incluant les feuilles, les branches et le tronc), qui est visible depuis le ciel [1]. Une limite de hauteur est généralement utilisée pour distinguer la canopée des arbres de la végétation basse, mais il n'y a pas de consensus sur la valeur de cette limite. Ce peut être par exemple 2, 3, ou 7 mètres. Dans le cadre du mandat confié par l'INSPQ au CERFO, toute la végétation d'une hauteur minimale de deux mètres a été considérée dans l'évaluation de la canopée, incluant donc les petits arbres et les haies.

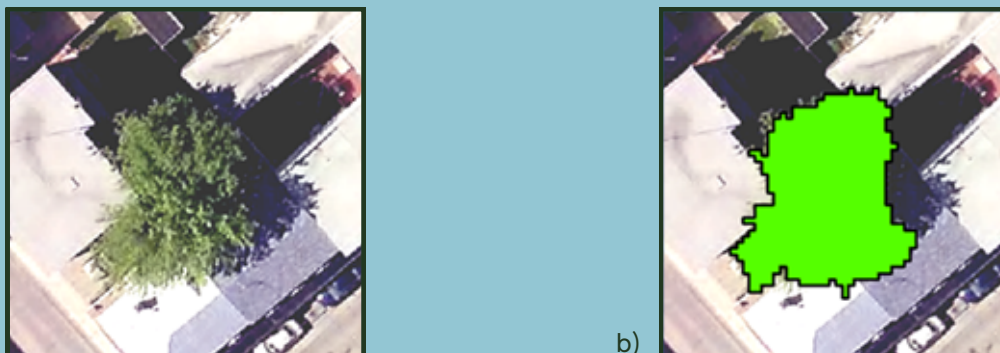


FIGURE 1: Exemple de délimitation de la canopée, a) image aérienne montrant la couronne d'un arbre en milieu urbain, b) délimitation de la canopée (l'espace occupé par la couronne de l'arbre).

Pourquoi une cartographie de la canopée?

Les arbres en milieu urbain offrent de nombreux bénéfices qui ont un effet positif sur la santé humaine. Par exemple, les arbres améliorent la qualité de l'air en filtrant les polluants atmosphériques et en rafraîchissant l'air ambiant par la formation de zones avec des températures plus basses, zones connues comme des « îlots de fraîcheur urbains ». Ils contribuent aussi à améliorer la santé de la population en constituant des milieux propices aux activités physiques et de plein air. Un milieu de vie avec des arbres est également reconnu pour favoriser le bien-être psychologique des gens vivant en ville et exerce une fonction sociale en facilitant les relations entre personnes habitant le même quartier et en renforçant le sentiment d'appartenance communautaire. Les arbres jouent aussi d'autres fonctions importantes comme contribuer à la biodiversité. Ils améliorent l'esthétique des villes et représentent une valeur économique non négligeable pour les propriétaires et les municipalités (notamment l'augmentation de la valeur foncière, la diminution des coûts de chauffage et de climatisation, et une gestion des eaux pluviales facilitée) [2].

L'étendue de la canopée évolue au fil du temps. Dans certains quartiers, elle risque de diminuer rapidement par le développement urbain et des projets d'infrastructures majeurs. Dans d'autres, des arbres peuvent mourir massivement, comme c'est le cas avec la présence

croissante de l'agrile du frêne. En contrepartie, certaines municipalités ont depuis plusieurs années un souci de verdifier leur territoire et les arbres plantés aujourd'hui contribueront à la canopée urbaine des prochaines décennies.

Ainsi, la cartographie de la canopée urbaine constitue un outil d'intérêt pour différentes parties prenantes, notamment celles du milieu municipal et de la santé publique, puisqu'elle permet entre autres de :

- Dresser le portrait de la canopée selon différentes divisions administratives;
- Faire le suivi de l'évolution de la couverture des arbres en milieu urbain afin d'identifier les zones où leur présence est limitée ou en régression;
- Mieux planifier et prioriser les futures interventions de verdissement et le développement urbain. On entend par verdissement la réduction des espaces couverts par des surfaces imperméables tels l'asphalte ou le béton et l'augmentation de la présence des végétaux, tels les arbres, les arbustes, les herbacées, le gazon;
- Dresser des bilans de suivi de la qualité de l'environnement.

Au cours des années, plusieurs cartographies de la canopée urbaine à l'échelle des principaux centres urbains du Québec ont été produites. Ces cartographies ont cependant utilisé une diversité d'approches méthodologiques qui rend difficile la comparaison des résultats entre différentes villes, entre autres:

→ **Des définitions différentes de la canopée** : la plus courante est celle de la végétation arborescente d'une hauteur supérieure à 2 m, mais elle peut varier en fonction des contextes et des besoins de chaque projet. Par exemple, les villes de Gatineau et Québec ont utilisé dans le passé une limite à 2 m, Montréal à 3 m et Sherbrooke à 7 m.

→ **Plusieurs méthodes, reposant sur des données sources variées** : des images aériennes ou satellitaires, avec ou sans l'infrarouge, des données lidar¹ ou la combinaison des multiples types de données.

→ **Des résolutions spatiales différentes** soit une divergence d'espace couvert par le plus petit détail discernable sur les différentes cartographies de la canopée.

Qu'est-ce qu'une région métropolitaine de recensement (RMR)?

Les régions métropolitaines de recensement sont des régions définies par Statistique Canada, formées d'une ou de plusieurs municipalités adjacentes situées autour d'un centre de population (aussi appelé noyau). Une RMR doit avoir une population totale d'au moins 100 000 habitants, et son noyau doit compter au moins 50 000 habitants selon les données ajustées du dernier Programme du Recensement de la population. Pour être incluses dans une RMR, les autres municipalités adjacentes doivent avoir un degré d'intégration élevé avec le noyau, lequel est déterminé par le pourcentage de navetteurs (déplacement domicile - lieu de travail).

¹ Le lidar (*Light Detection And Ranging* ou détection et télémétrie par ondes lumineuses) est une technique de télédétection qui utilise la lumière comme laser pour produire un nuage de points 3D. Pour davantage d'information, vous pouvez consulter la section 2 de l'annexe.

Dans ce contexte, l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) souhaite doter les acteurs impliqués dans le verdissement et l'aménagement urbains d'une cartographie de la canopée de référence pour toutes les grandes régions urbaines du Québec afin d'assurer un suivi cohérent de la canopée. L'objectif du mandat confié par l'INSPQ au Centre d'enseignement et de recherche en foresterie (CERFO) est ainsi de cartographier la canopée pour les six régions métropolitaines de recensement (RMR) du Québec, couvrant une superficie de 16 403 km² et correspondant au territoire occupé par environ 70 % de la population du Québec.

Quelle carte a été produite et comment y accéder?

Carte produite et étendue couverte

La carte de la canopée couvre l'étendue des six RMR du Québec, soit Saguenay, Québec, Sherbrooke, Trois-Rivières, Montréal et Gatineau (figure 2). Dans cette cartographie, la hauteur de la canopée est enregistrée en mètre et est disponible pour toute la végétation d'une hauteur minimale de deux mètres, incluant aussi les petits arbres et les haies. La résolution spatiale, soit le niveau de détail de la carte, est d'un mètre. Un seul type de donnée a été utilisé pour cartographier la canopée, soit la donnée lidar, dont la date d'acquisition varie entre 2010 et 2020. La date précise de la donnée lidar pour chaque zone cartographiée est disponible dans le fichier *Métadonnées de production*.

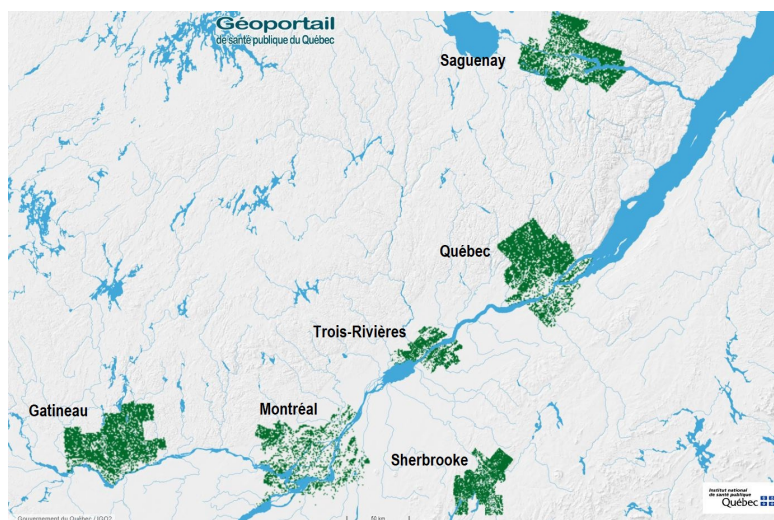


FIGURE 2 : Cartographie de la canopée (en vert), qui couvre l'étendue des six RMR du Québec

Comment accéder aux cartes de la canopée pour chaque RMR?

Les cartes peuvent être visualisées, imprimées et téléchargées. Les données sont disponibles en format matriciel ou vectoriel :

→ **Les données en format matriciel** sont des images géolocalisées en format *Tag Image File Format* (TIFF), constituées de pixels. Chaque pixel a une valeur correspondant à la hauteur de canopée (2 m et plus). Ces images peuvent être téléchargées à partir d'un index géospatial contenant les limites de chacune des images, soit des feuillets 1/20 000 (zones rectangulaires d'environ 20 km de longitude et 14 km de latitude, formant une mosaïque couvrant l'ensemble du territoire des RMR).

→ **Les données en format vectoriel** sont constituées de polygones délimitant la zone couverte par la canopée de 2 m et plus dans chacune des six RMR. Chacun des fichiers vectoriels est disponible en fichier de forme (SHP) ou en base de données géospatiales (FGDB).

Deux voies d'accès aux données sont possibles :

1. Le « **Géoportail de santé publique du Québec** ». Pour une consultation interactive des cartes de la canopée des six RMR, aller dans la section « Environnements naturels ».

Consulter le « **Guide d'utilisation : Géoportail de santé publique du Québec** » sur cette page pour un soutien à la navigation. La figure 3 donne un aperçu des cartes consultables sur le Géoportail. Par défaut, la canopée de 2 mètres et plus est affichée. Un menu déroulant permet de sélectionner et d'afficher la canopée de 3 ou 7 mètres et plus. Il est également possible de visualiser et comparer les cartes de la canopée avec d'autres données pertinentes, comme la carte des îlots de chaleur urbains ou la carte de l'indice de défavorisation matérielle et sociale. L'utilisateur peut aussi choisir un fond de carte des données topographiques (routes, hydrographie et toponymes) afin de faciliter la navigation. Une recherche par toponyme (p. ex., nom de ville) est également disponible. Le Géoportail permet finalement d'exporter la carte en format PDF ou de l'imprimer, partager un lien avec les couches pertinentes et la zone d'intérêt. Les liens de téléchargement des feuillets de la canopée en format matriciel sont aussi accessibles sur le Géoportail à partir de la couche *Téléchargement de la canopée par RMR*.

2. La page « **Canopée des six RMR du Québec 2022** » du site **Données Québec**. On y retrouve les liens vers :

→ **Les cartes interactives** pour chacune des 6 RMR disponibles sur le Géoportail de santé publique du Québec;

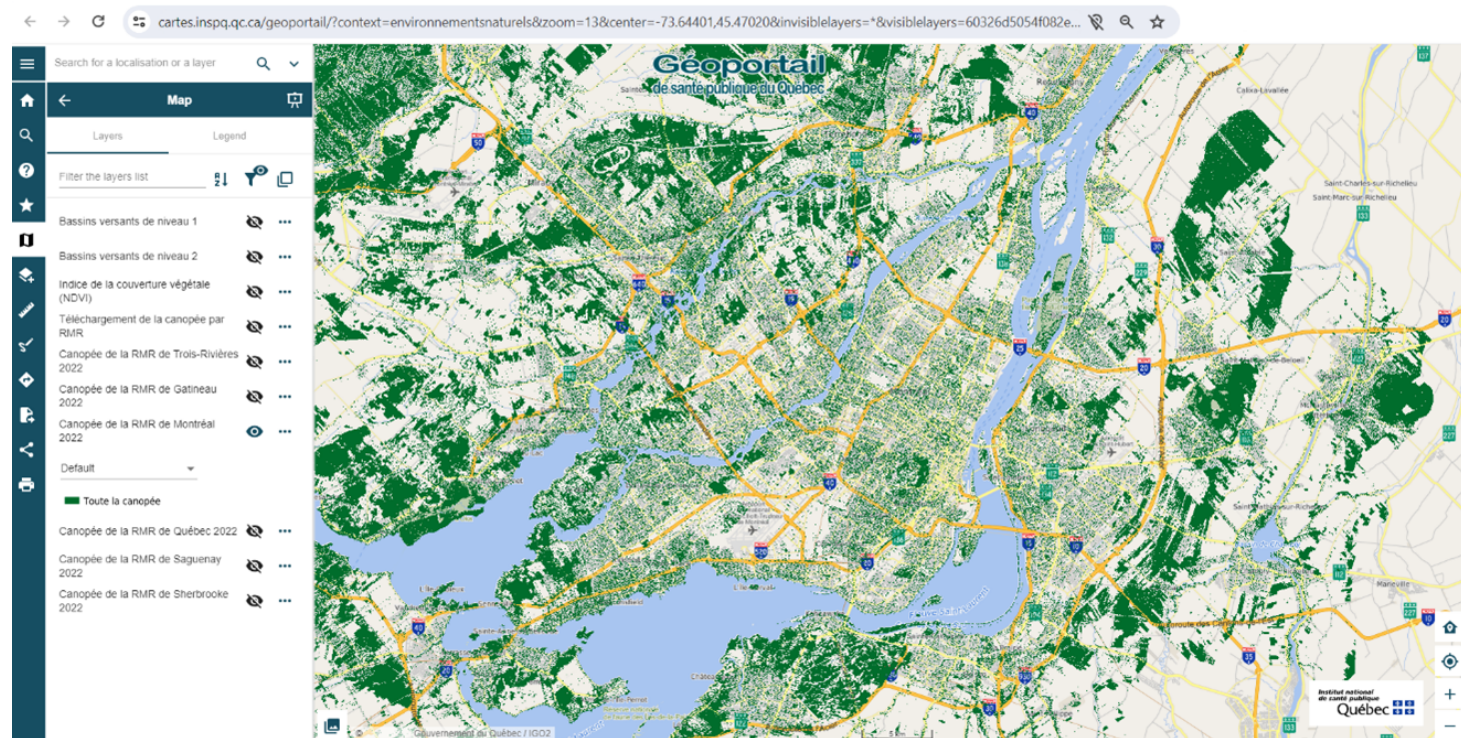


FIGURE 3 : Vue du Géoportail avec la carte de la canopée de plus de 2 mètres (en vert) – Extrait de la RMR de Montréal. La carte topographique et le réseau routier sont affichés pour la localisation.

**→ Les données téléchargeables:**

- Les liens de téléchargement des données matricielles (hauteur de la canopée de 2 m et plus) par feuillet 1/20 000. La sélection des feuillets d'intérêt peut se faire par leur numéro dans une table (format CSV) ou en consultant l'index géospatial des feuillets (format de forme SHP);
- La cartographie de la canopée pour chacune des six RMR en format vectoriel (FGDB), couvrant la surface de la canopée de 2 m et plus.

→ La documentation disponible:

- Le *Rapport méthodologique* détaillé (PDF);
- Le document *Canopée des six RMR du Québec 2022 Description des variables* (PDF) contenant une description détaillée de la cartographie en format matriciel et vectoriel;
- Les *Métadonnées* de production en format vectoriel (SHP) contenant les informations notamment sur l'année de l'acquisition lidar et l'état de la canopée lors de l'acquisition des données (avec ou sans feuilles);
- Le *Guide d'utilisation - Téléchargement des données* (PDF).

Exemples d'utilisation de la carte et ses limites

Exemples d'utilisation

Les cartes de canopée constituent surtout des outils de planification à moyen ou long terme pour guider les intervenants et intervenantes, comme ceux du milieu municipal ou de la santé publique, dans leur prise de décision. Les acteurs réalisant des projets de verdissement, des évaluations de la qualité de l'environnement et la mise en place de mesures de lutte contre les îlots de chaleur urbains peuvent ainsi utiliser cette cartographie comme variable d'analyse.

Exemple 1: Suivi de l'évolution de la canopée.

Ce type de suivi peut être réalisé par les municipalités du Québec, afin de guider l'atteinte des cibles qu'elles se sont fixées à différentes échelles de leur territoire. L'avantage d'avoir produit une cartographie de toutes les RMR avec la même méthode permet d'effectuer des comparaisons entre plusieurs secteurs, intra et inter RMR, même s'il faut considérer que le portrait de la canopée peut s'étaler sur 10 ans (2010-2020) selon la donnée utilisée. L'indice de la canopée, correspondant au pourcentage de la surface

couverte par la canopée sur une superficie donnée (par exemple une RMR) par rapport à la superficie totale, est un outil intéressant pour suivre et comparer plusieurs territoires. À titre d'exemple, le tableau 1 présente l'indice de canopée calculé pour les six RMR du Québec à partir de la nouvelle cartographie de la canopée.

TABLEAU 1. Superficie occupée par la canopée et indice de canopée par RMR

RMR	Superficie de canopée (km ²)	Indice de canopée (%)
Gatineau	2 250,6	75,9
Québec	2 219,2	66,9
Montréal	1 367,6	32,6
Sherbrooke	871,2	59,7
Saguenay	1 812,4	71,9
Trois-Rivières	450,0	43,6

Exemple 2: Identification d'une trame verte continue et interconnectée

La cartographie de la canopée peut aussi être utilisée pour guider le tracé d'une trame verte et localiser des sites qui pourraient constituer de futurs parcs urbains intégrés à cette dernière. En effet, une telle carte permet de cibler les sites névralgiques nécessitant un renforcement de la présence des arbres, tout en ayant une approche globale intégrant les îlots de verdure actuels. À titre d'exemple, Nature Québec a réalisé avec le Comité citoyen et citoyenne du quartier Saint-Sauveur à Québec une carte conceptuelle qui propose une vision des axes principaux à verdir dans le quartier Saint-Sauveur (Figure 4). La carte de la canopée en fond de plan a permis d'identifier facilement les zones qui sont en déficit d'arbres et les zones vertes existantes, alimentant ainsi la réflexion pour le tracé d'une trame verte interconnectée et continue dans le quartier.



QUARTIER SAINT-SAUVEUR PARCS, CANOPÉE ET CORRIDORS ÉCOLOGIQUES

vision proposée par
Comité des Citoyennes et Citoyens du Quartier Saint-Sauveur,
Verdir Saint-Sauveur et Nature Québec

LÉGENDE

- Couvert végétal existant
- Zone végétalisée et parc existant
- Grand parc urbain existant
- Grand parc urbain
- Petit parc urbain
- Corridors écologiques formant une trame verte interconnectée et continue

parcs existants

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 1. Parc Dollard-des-Ormeaux | 5. Parc Durocher |
| 2. Parc des Braves | 6. Oasis Sauvageau |
| 3. Parc Roger-Lemelin | 7. Parc Victoria |
| 4. Oasis Saint-Malo | 8. Parc de la Pointe-aux-Lièvres |



exemple de corridor écologique
Rue Demers
Montréal, Qc



FIGURE 4 : Carte conceptuelle des sites à verdir dans le quartier de Saint-Sauveur à Québec : grands et petits parcs urbains potentiels et corridors écologiques potentiels reliant les parcs existants et potentiels

Exemple 3: Priorisation des sites à verdir pour optimiser les bénéfices du verdissement

La cartographie de la canopée peut aussi être utilisée dans le cadre d'analyse de priorisation du verdissement intégrant plusieurs paramètres décisionnels, afin de cibler les sites pour lesquels les bénéfices du verdissement seront supérieurs. Par exemple, dans le cadre d'un de ses mandats avec le Collectif Canopée [3], le CERFO a développé un indice de priorisation des sites de verdissement à l'échelle des îlots de diffusion (ID)² des municipalités des régions de la Capitale-Nationale et de Chaudière-Appalaches. Cet indice de priorisation résultant d'une analyse multicritère intègre quatre indicateurs :

- Le ratio de la superficie de canopée par rapport à la superficie totale de l'ID (végétation de 2 m et plus de hauteur);
- Le ratio de la superficie occupée par les îlots de chaleur (classes 8 et 9 de la cartographie produite par le CERFO pour l'INSPQ) par rapport à la superficie de l'ID [4-6];
- Le ratio des surfaces imperméables par rapport à la superficie de l'ID;
- L'indice combiné de défavorisation matérielle et sociale associé à chaque ID [7].

La figure 5 présente un exemple de cartographie de la canopée, des quatre indicateurs et de l'indice final de priorisation du verdissement. Les classes en vert correspondent à des ID peu prioritaires pour le verdissement, tandis que les ID en rouge sont les plus prioritaires. Cet outil est utilisé par le Collectif Canopée pour prioriser l'effort de verdissement à une échelle fine du territoire et cibler les secteurs où il doit mettre plus d'effort pour convaincre les propriétaires privés d'accepter de planter des arbres sur leur terrain.

²La plus petite unité géographique couverte par Statistique Canada

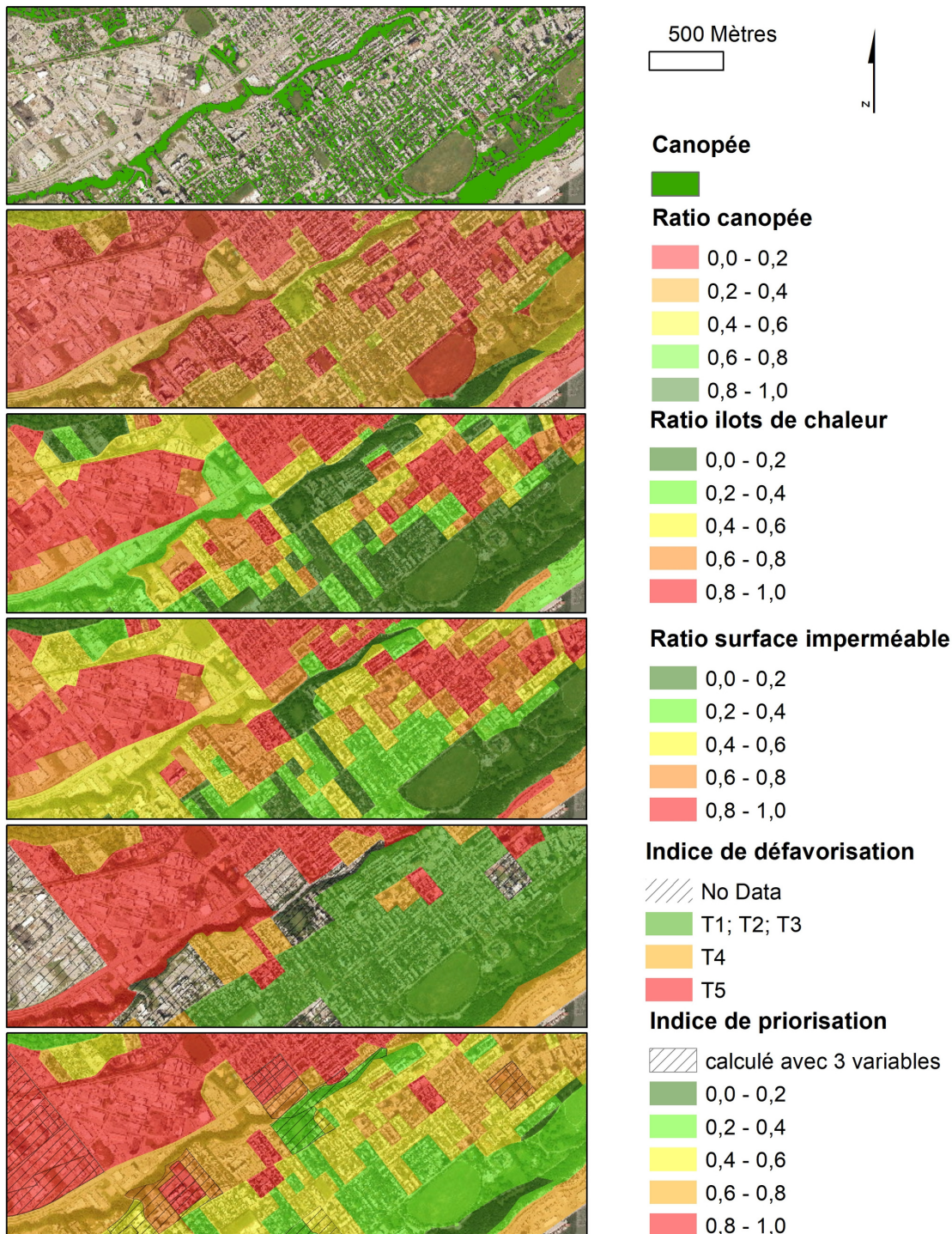


FIGURE 5 : Exemple d'utilisation des données pour calculer un indice de priorisation des sites de verdissement par îlot de diffusion. Quartiers Montcalm et Saint-Sauveur, Ville de Québec.

L'indice de priorisation, calculé à l'échelle de l'îlot de diffusion, ainsi que les quatre indicateurs qui ont servi à son calcul (ratio de canopée, ratio des îlots de chaleur, indice d'imperméabilité et indice de défavorisation) sont représentés par une plage de couleurs allant du rouge au vert. Le rouge représente des ID où le verdissement devrait être priorisé selon l'indicateur analysé alors que le vert représente des ID où le verdissement est moins prioritaire.



Limites d'utilisation

La principale limite concerne la variabilité dans le temps des données lidar utilisées. Les données lidar stockées et gérées par le gouvernement du Québec sont acquises à une fréquence variable. Dans le cas des RMR ciblées pour le projet, les données couvrent la période de 2010 à 2020. Comme le paysage urbain peut évoluer rapidement (p. ex., déboisement d'un site pour un nouveau projet d'urbanisation), le portrait de la canopée établi à partir de données de 2010 pourrait n'être plus à jour. Ce pourrait aussi être le cas lorsqu'une ville réalise de grands chantiers de plantations sur son territoire depuis quelques années. Ces arbres sont amenés à grossir et à voir leur canopée se développer. Il est donc recommandé de consulter la carte de la canopée accompagnée de la carte des dates d'acquisition du lidar pour estimer les possibles changements entre la date d'acquisition des données lidar et la date de production de la carte de la canopée.

Une autre limite concerne l'état de la canopée lors de l'acquisition des données lidar. L'absence du feuillage génère une sous-estimation de la superficie de la canopée. Or, certaines données ont été prises en dehors de la période de feuillaison. L'information sur la date d'acquisition du lidar et sur l'état de la canopée peut être consultée dans les *Métadonnées de production*.

Finalement, la couverture de la carte se limite à l'étendue des six RMR du Québec. Ce choix a été imposé pour des raisons de coûts et de disponibilité des données:

- Le traitement des données lidar brutes et l'algorithme d'apprentissage profond (voir l'annexe) qui a été utilisé demandent des ressources importantes en termes d'espace mémoire, de temps et de puissance de calcul informatique, influençant directement le coût de traitement;
- Les données lidar ont été acquises progressivement par le gouvernement du Québec et ses partenaires et couvrent majoritairement la partie sud de la province. Tenant compte de ces contraintes, l'INSPQ a priorisé la cartographie de la superficie des six RMR du Québec situées dans le sud et qui couvrent déjà 70 % de la population.

Il serait cependant possible d'augmenter la couverture spatiale de la carte de la canopée en utilisant l'algorithme développé par le CERFO pour autant que la donnée lidar soit disponible. Dans le cas contraire, d'autres sources de données pourraient être utilisées, comme l'imagerie aérienne ou satellitaire, et une nouvelle méthodologie devrait alors être appliquée. À titre d'exemple, le CERFO a réalisé en 2015 puis en 2020 une cartographie de la canopée pour la ville de Québec grâce à des images satellitaires exclusivement en utilisant une autre approche méthodologique [8,9].

Il est aussi à noter que l'algorithme d'apprentissage profond utilisé pour produire les cartes décrites dans cette note technique a été entraîné pour faire la distinction en milieu urbain entre la canopée et les autres objets élevés comme les bâtiments, les poteaux, les ponts, les voitures. Cependant, dans un environnement purement forestier, cet algorithme n'est pas nécessaire, et une méthodologie plus simple et moins coûteuse peut être utilisée pour cartographier la canopée à partir des données lidar. Un simple seuil de deux mètres appliqué au modèle de hauteur de la canopée (MHC), un produit dérivé du lidar enregistrant la hauteur maximale de la canopée au-dessus du sol et disponible sur Données Québec, donne déjà des résultats tout à fait satisfaisants.

Annexe : Selon quelle méthodologie la carte a-t-elle été produite?

1. Choix de la méthode

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour cartographier la canopée urbaine. La plupart utilisent l'imagerie satellitaire ou aérienne pour délimiter les espaces végétalisés par rapport à d'autres espaces, notamment en utilisant des indices de végétation tels que le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) [8-10]. Les données lidar peuvent être ajoutées aux images pour avoir l'information sur la hauteur de la végétation [11], donnée difficile à obtenir seulement par l'imagerie. Ces méthodes, bien qu'offrant des performances intéressantes, présentent plusieurs limites liées aux problèmes d'alignement entre les données d'imagerie et du lidar ou au coût engendré par l'acquisition conjointe d'images et du lidar pour un grand territoire.

Depuis 2012, le gouvernement du Québec a mis en place un programme d'acquisition, de traitement et de mise à disposition des données lidar avec une perspective de mise à jour aux 10 ans environ [12]. Considérant les développements des dernières années en apprentissage profond, l'utilisation uniquement du lidar pour cartographier la canopée en milieu urbain devient une solution de choix. En effet, l'apprentissage profond (voir définition dans la section 3) permet à partir des données lidar de distinguer les objets (p. ex., canopée versus bâtiments), cette information étant traditionnellement obtenue à partir des données d'imagerie.

2. Que sont les données lidar?

Le lidar (*Light Detection And Ranging* ou détection et télémétrie par ondes lumineuses) est une technique de télédétection optique active qui utilise la lumière comme un laser pour produire un nuage de points 3D (points avec des coordonnées x, y, z). Ainsi, un nombre très élevé de faisceaux laser est émis par l'appareil aéroporté qui capte par la suite les retours des ondes réfléchies par les objets rencontrés (branches, toits, sol, etc.). La distance de l'objet par rapport à l'appareil est calculée en fonction du temps que le faisceau met à parcourir cette distance aller-retour (Figure 6).

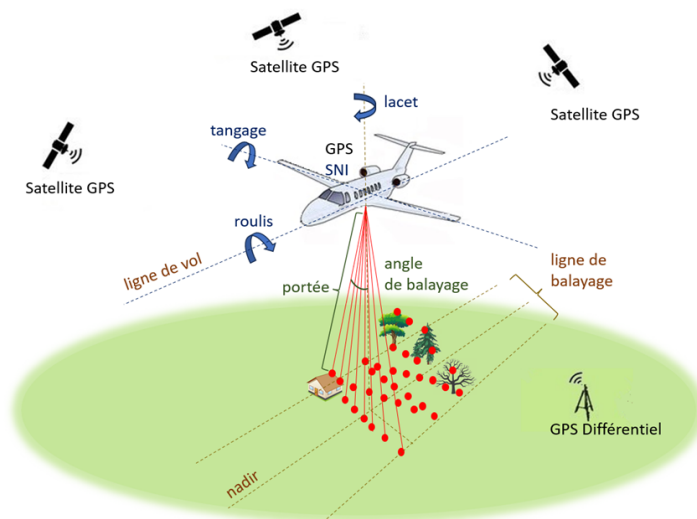


FIGURE 6 : Exemple de système de balayage lidar aéroporté.

Les coordonnées des points lidar sont calculées en fonction de a) la portée mesurée par le temps de retour du faisceau laser émis par le lidar et de son angle de balayage, b) la position de l'avion, mesurée par le système GPS (Global Positioning System) comprenant les satellites GPS, le GPS différentiel (au sol) et le GPS de l'avion, et c) l'orientation de l'avion (roulis, tangage, lacet) mesuré par un système de navigation inertielle (SNI). Le balayage latéral par rapport au nadir permet de couvrir une surface plus étendue, soit une ligne de balayage. Source : Adapté de [13]

Les données lidar acquises par avion permettent d'obtenir un nuage de points suffisamment dense pour pouvoir cartographier les objets comme les bâtiments, les routes ou les arbres. Un exemple de nuage de points lidar est donné dans la figure 7.

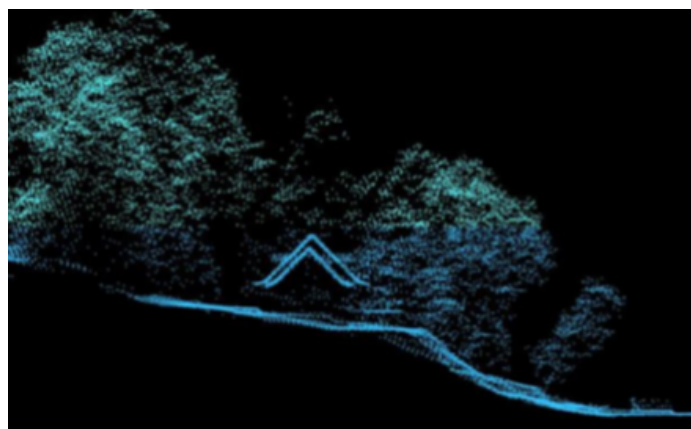


FIGURE 7 : Exemple de nuage de points lidar représentant des arbres, le toit d'une maison et le sol en pente

La qualité des données lidar conditionne directement la précision de l'identification des objets. Elle dépend de certaines caractéristiques de l'acquisition. Par exemple, la hauteur et la vitesse du vol influencent la densité du nuage de points, une haute densité permettant une meilleure identification des objets. La hauteur du vol et la configuration du capteur déterminent aussi la taille de l'empreinte au sol, soit la dimension de la surface illuminée par un faisceau laser. Une petite empreinte au sol permet d'avoir des données plus précises. Par ailleurs, les faisceaux laser peuvent traverser la canopée des arbres de telle manière que les retours lidar sont générés autant à partir de la cime des arbres qu'à partir du sol en dessous de la canopée. La différence entre la hauteur des points (Hauteur canopée – Hauteur sol) correspondant à ces retours permet de mesurer la hauteur des arbres. La possibilité pour les rayons laser de pénétrer à travers la canopée et de générer plusieurs retours est la principale caractéristique qui permet de distinguer la végétation haute par rapport à d'autres surfaces construites (p. ex. béton, asphalte), non pénétrables par les rayons laser et qui génèrent, en conséquence, des retours uniques (Figure 8).

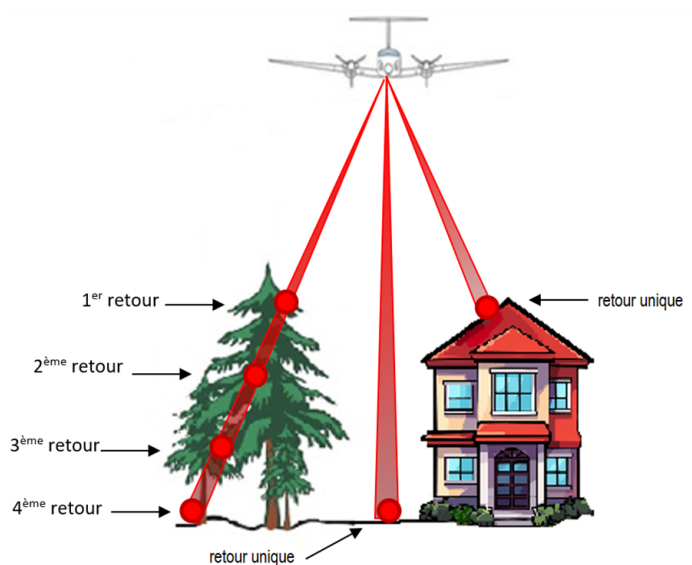


FIGURE 8 : Lidar aéroporté : exemple de différence du nombre de retours lidar par faisceau émis en fonction des caractéristiques de l'occupation du sol (arbres – plusieurs retours, sol nu ou maison – retour unique).

3. Description de la méthode utilisée

Ce projet vise le développement d'un modèle d'apprentissage profond en utilisant uniquement les données lidar [12]. Le processus d'entraînement du modèle final comprend plusieurs phases d'entraînement supervisé et non supervisé, plusieurs itérations des étapes d'entraînement – validation – corrections – réentraînement, ainsi que la comparaison de la prédiction de plusieurs sous-modèles (ensemble de modèles). Cette démarche d'entraînement itératif a été mise en place pour 1) entraîner progressivement le modèle et 2) avoir une cartographie de référence représentative de l'ensemble des contextes présents dans les RMR et de la diversité des caractéristiques d'acquisition des données lidar. Les étapes du développement du modèle et de la prédiction sont présentées dans la figure 9 et décrites plus en détail ensuite.

Qu'est-ce qu'un modèle d'apprentissage profond?

L'**apprentissage profond** est un sous-domaine de l'intelligence artificielle utilisant des algorithmes capables de réaliser des tâches complexes (p. ex. : avoir des discussions ou analyser des images). En analyse d'images, ces algorithmes ont la capacité de reconnaître des patrons et des textures afin d'identifier ou de classer les objets voulus. Cependant, les algorithmes d'apprentissage profond ont besoin d'une grande quantité d'images d'entraînement représentant des exemples que l'algorithme tentera de reproduire pour arriver à des résultats satisfaisants.

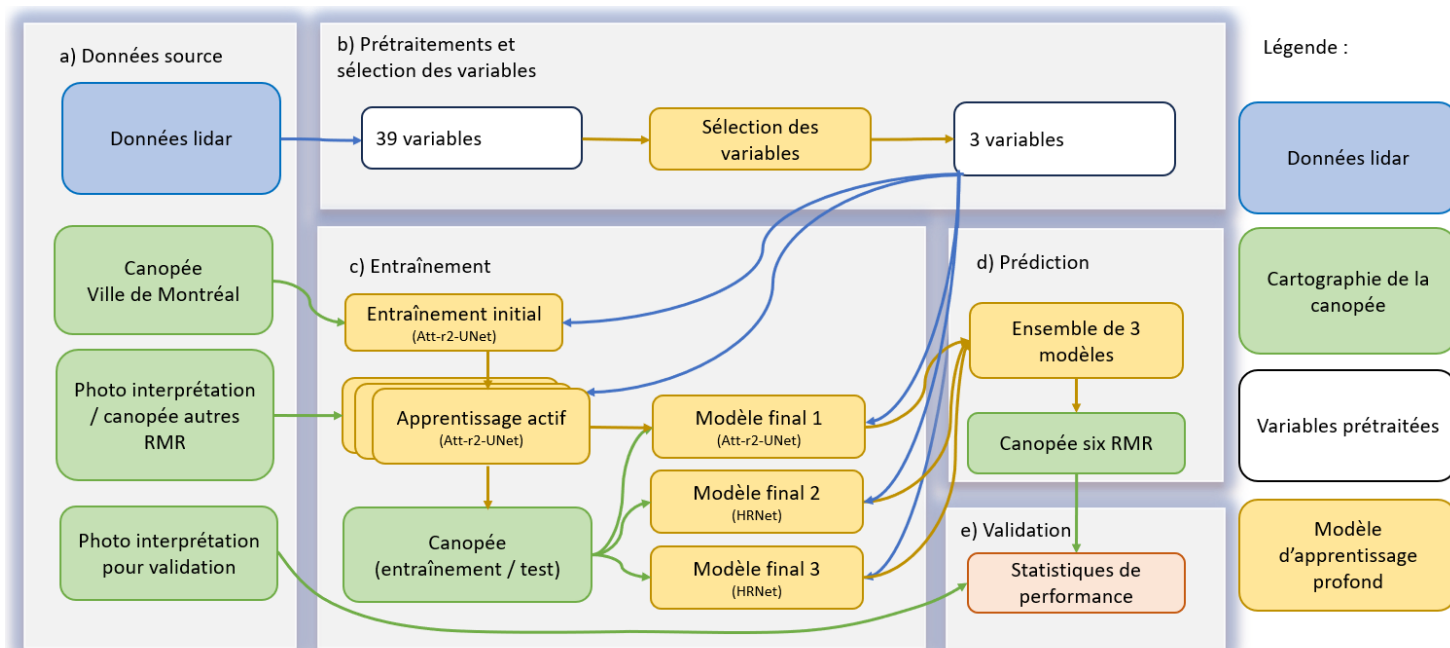


FIGURE 9 : Description simplifiée des étapes de développement du modèle

a) Données sources

Plusieurs données ont été utilisées, soit des données de référence pour entraîner et tester le modèle et des données lidar pour réaliser la cartographie finale des 6 RMR :

→ Données de référence :

- La cartographie de la **canopée de la ville de Montréal** (trois mètres et plus), réalisée avec des données lidar et des images aériennes acquises en 2015 [14];
- La **photo-interprétation de la canopée urbaine** réalisée par le CERFO et couvrant plusieurs secteurs dans les 6 RMR. Une partie de ces données a servi pour l'entraînement des modèles (13 zones de 2 km X 2 km, réparties dans les RMR autres que Montréal). Un jeu de données distinct a servi à la validation des prédictions : 540 tuiles de 50 m X 50 m photo-interprétées pixel par pixel, réparties également sur les six RMR et dans trois types d'environnement, soit urbain, rural et agricole.

→ Données lidar :

- Ces données ont été obtenues sur demande auprès du gouvernement et de la ville de Montréal. Il s'agit de nuages de points lidar couvrant les six RMR. Ces données ont été acquises entre 2010 et 2020, dans des conditions diverses selon l'objectif de chaque projet, avec ou sans feuilles et avec différentes densités de points variant entre 1 et 25 points/m² [12,14].

b) Prétraitements et sélection des variables

Trente-neuf variables prédictives décrivant la structure verticale des points ont été sélectionnées et calculées à partir des nuages de points lidar de la ville de Montréal. Un algorithme d'apprentissage profond a ensuite été utilisé pour déterminer l'importance des variables pour la détection de la canopée [15]. Les **trois variables** les plus pertinentes ont été retenues et calculées sur l'ensemble du territoire des 6 RMR grâce aux données lidar gouvernementales. Elles sont illustrées à la figure 10 :

- Le modèle de hauteur de la canopée (MHC) (hauteur de tous les objets au dessus du sol incluant la canopée et les bâtiments);
- La hauteur moyenne des points au-dessus du sol;
- L'écart-type de ces hauteurs.

c) Entraînement

Un premier modèle de type *Attention residual recurrent unet* (Att-r2-UNet) [16] a été entraîné à détecter la canopée à partir des données lidar à Montréal et de la cartographie de sa canopée (**entraînement initial**). Ce modèle a ensuite été appliqué sur les données des autres RMR, qui possèdent des caractéristiques différentes en ce qui concerne les conditions d'acquisition du lidar (densité des points, acquisition avec ou sans feuilles), les espèces d'arbres et la présence de nouveaux contextes.



FIGURE 10 : Exemple d'illustration des variables utilisées dans le modèle de prédiction

Certaines erreurs étaient attendues, principalement des faux positifs (canopée faussement détectée) dus à la présence de nouveaux éléments observables sur les différentes zones (p. ex. bateaux, chutes d'eau, pylônes électriques) qui n'étaient pas ou peu présents dans les données d'entraînement de Montréal. Après correction manuelle de ces erreurs et un réentraînement du modèle (**apprentissage actif**), un nouveau modèle amélioré et adapté à la diversité des caractéristiques d'enregistrement des données lidar et à la variété des éléments rencontrés a été obtenu. Finalement, une dernière phase d'apprentissage actif a permis de faire des corrections sur des éléments très peu présents comme les carrières, les raffineries, les camions et les ponts. Il en résulte le **modèle final 1**.

Afin d'augmenter la qualité de la cartographie de la canopée produite, une technique couramment utilisée en intelligence artificielle consiste à mettre en place un ensemble de modèles [17]. Plusieurs modèles différents sont entraînés afin de créer des « experts » en identification de la canopée. Il suffit ensuite de faire un vote majoritaire sur la prédiction des différents modèles experts pour décider s'il y a bel et bien présence de canopée. Pour ce faire, deux modèles supplémentaires, de type HRNet [18], ont été entraînés à des résolutions différentes grâce aux jeux de données construits lors des phases précédentes (**modèle final 2 et modèle final 3**).

d) Prédiction

La prédiction finale de la canopée sur l'ensemble des 6 RMR a été réalisée par **l'ensemble des trois modèles de prédiction**, chacun étant plus performant dans certains contextes. La classe « canopée » a été attribuée à un pixel si au moins deux des trois modèles y ont identifié une canopée.

e) Validation

Les prédictions produites ont été évaluées en les comparant à des valeurs de référence obtenues par photo-interprétation. La prédiction de la canopée par l'ensemble des 3 modèles finaux montre d'excellents résultats de classification (précision globale de 97 %). Les modèles montrent ainsi une très bonne capacité de discernement des éléments présents, notamment pour distinguer la canopée urbaine par rapport à une grande diversité de structures qui peuvent être confondues avec la végétation, lorsqu'elles sont analysées uniquement avec des données lidar (p. ex. fils électriques, poteaux ou autres structures élevées).

La figure 11 illustre un exemple à Montréal de la comparaison entre, d'une part, la canopée prédite par apprentissage profond à partir de données lidar de 2018 et, d'autre part, la canopée obtenue par la ville de Montréal sur la base de données lidar et d'imageries aériennes de 2015. Les différences visibles entre les deux cartographies reflètent en partie les changements réels de canopée

dans le temps, comme par exemple la coupe d'arbres (illustrée par un cercle jaune sur la figure) ou l'étalement des canopées. Dans certains cas, il arrive aussi que les données prédites par apprentissage profond soient de meilleure précision et détectent des arbres qui ne l'avaient pas été dans la carte de 2015 (cercle en rouge sur la figure).

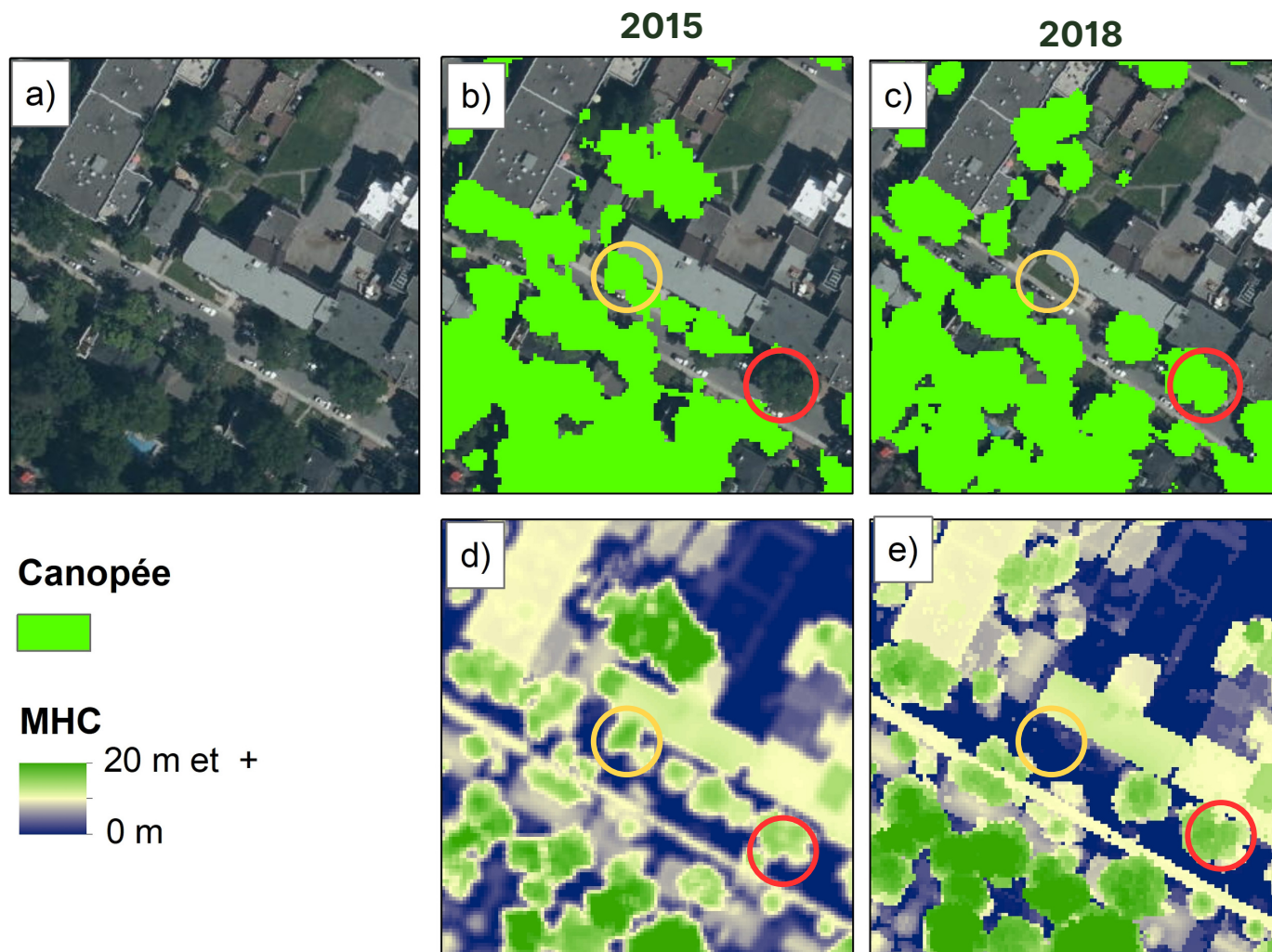


FIGURE 11 : Évaluation visuelle de la carte de canopée, exemple à Montréal

- a) Image aérienne 2018
- b) Canopée 2015 produite par la ville de Montréal
- c) Canopée 2018 produite par apprentissage profond
- d) Modèle de hauteur de canopée - MHC 2015
- e) MHC 2018

Le cercle jaune est un exemple d'arbre présent en 2015 et coupé en 2018; le cercle rouge est un exemple d'arbre non détecté en 2015, mais détecté en 2018.



Principales références

[1] S. B. Jennings, N. D. Brown, et D. Sheil, « Assessing forest canopies and understorey illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures », *Forestry*, vol. 72, no 1, p. 59-73, 1999.

[2] G. Lessard et E. Boulfroy, « Les rôles de l'arbre en ville », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO), Québec, 2008.

[3] B. C. Budei, V. Gauthray-Guyénet, E. Boulfroy, et M. Varin, « Priorisation des sites de plantation pour le verdissement des deux rives », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO), 23-02, 2023.

[4] B. C. Budei, J. Marchal, F. Nininahazwe, M.-A. Genest, B. Bour, et M. Varin, « Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8/9 (2020-2021-2022) et analyse de changement », Rapport technique 2023-01, 2023.

[5] J. Marchal, B. Bour, B. C. Budei, F. Nininahazwe, C. Armellin, et M. Varin, « Cartographie des îlots de chaleur et de fraîcheur dans le Québec urbain à l'aide d'imagerie satellitaire Landsat-8 (2013-2014) », Centre d'enseignement et de recherche de Sainte-Foy inc. (CERFO), Rapport 2022-29, 2022.

[6] B. C. Budei et al., « Cartes des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains : clés pour les interpréter et les utiliser », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie (CERFO), Note technique 2023-05, 2023.

[7] Institut National De Santé Publique Du Québec (INSPQ). Indice de défavorisation du Québec 2016, [Jeu de données], dans Données Québec, 2019, mis à jour le 18 janvier 2024. [<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/indice-de-defavorisation-du-quebec-2016>], (consulté le 12 février 2024).

[8] M. Varin et E. Boulfroy, « Une méthode novatrice pour cartographier la canopée de la ville de Québec : la classification orientée-objet utilisant le proche infrarouge », Le Centre d'enseignement et de recherche en foresterie (CERFO), Note technique 2015-02, 2015.

[9] M. Varin, G. Sena, M. -A. Genest, C. Armellin, et A. -M. Dubois, « Cartographie de l'indice de canopée 2020 de la ville de Québec par une classification orientée-objet », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO), Note technique 2020-02, 2020.

[10] M. Varin et E. Boulfroy, « Calcul d'un indice de canopée pour le territoire de la ville de Québec », Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO), 2014.

[11] S. W. MacFaden, J. P. O'Neil-Dunne, A. R. Royar, J. W. Lu, et A. G. Rundle, « High-resolution tree canopy mapping for New York City using LIDAR and object-based image analysis », *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 6, no 1, 2012.

[12] Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts, « LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente) », Données Québec, mis à jour 2023. Consulté le: 28 décembre 2023. [En ligne], Disponible sur: <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>

[13] A. Harikumar, « Advanced methods for tree species classification and biophysical parameter estimation using crown geometric information in high density LiDAR data », 2020. doi: 10.13140/RG.2.2.10395.69922.

[14] Ville de Montréal, « Canopée 2015 », Consulté le: 16 novembre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://donnees.montreal.ca/dataset/canopee>

[15] M. Ahmad, S. Protasov, et A. Khan, « Hyperspectral Band Selection Using Unsupervised Non-Linear Deep Auto Encoder to Train External Classifiers », *CoRR*, 2017.

[16] Q. Zuo, S. Chen, et Z. Wang, « R2AU-Net: Attention Recurrent Residual Convolutional Neural Network for Multimodal Medical Image Segmentation », *Security and Communication Networks*, vol. 2021, p. e 6625688, juin 2021, doi: 10.1155/2021/6625688.

[17] X. Dong, Z. Yu, W. Cao, Y. Shi, et Q. Ma, « A survey on ensemble learning », *Front. Comput. Sci.*, vol. 14, no 2, p. 241-258, avr. 2020, doi: 10.1007/s 11704-019-8208 -z.

[18] J. Wang et al., « Deep High-Resolution Representation Learning for Visual Recognition », arXiv:1908. 07919 [cs], mars 2020, Consulté le: 1 mars 2022. [En ligne], Disponible sur: <http://arxiv.org/abs/1908.07919>

Remerciements : INSPQ (Antoine Saint-Amand, Laurie-Maure Drapeau, Geneviève Grenier, Ray Bustinza)

Ce projet de technote est financé dans le cadre du Plan pour une économie verte 2030.

cerfo

FORMATION
ACCOMPAGNEMENT
RECHERCHE
EN FORESTERIE

Tél. : (418) 659-4225
Courriel : info@cerfo.qc.ca

CERFO.QC.CA

Communiquez avec notre équipe :

Mathieu Varin, M. Sc. mvarin@cerfo.qc.ca