Communauté métropolitaine de Québec

CARNET MÉTHODOLOGIQUE

Imperméabilisation des sols



Plan métropolitain d'aménagement et de développement révisé

Août 2025

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS **3**

1. MISE EN CONTEXTE **4**

2. MÉTHODOLOGIE **5**

2.1 Démarches de co-construction mises en place 5

2.2 Étapes de la méthodologie 5

2.2.1 Production d'un modèle de segmentation sémantique sur image aérienne 7

2.2.2 Production d'une couverture de sols pour le territoire métropolitain 10

2.2.3 Production d'une matrice d'imperméabilisation des sols 12

2.3 Limite et biais de la méthodologie 13

3. RÉSULTATS ET CONSTATS **14**

3.1 Résultats 14

3.2 Constats 14

3.3 Lien avec le PMAD 15

4. SUIVI **15**

5. INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES **15**

RÉFÉRENCES **16**

AVANT-PROPOS

Les carnets méthodologiques sont des outils essentiels pour comprendre et documenter les réflexions menées dans la révision du Plan métropolitain d'aménagement et de développement révisé (PMADR) de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQuébec). Leur principal objectif est de consigner de manière détaillée les étapes méthodologiques et les résultats obtenus. Ils offrent ainsi une traçabilité et une meilleure compréhension des décisions d'aménagement présentes dans le PMADR.

Cette démarche garantit la rigueur scientifique des travaux en assurant une consultation durable de tous les paramètres méthodologiques utilisés, tout en détaillant les sources de ces données. En outre, les carnets favorisent une réflexion critique et continue sur les méthodologies employées et les conclusions qui en découlent. En explicitant ces méthodologies, ils fournissent un référentiel clair et précis, consultable et révisable à tout moment par l'ensemble des parties prenantes. Cela facilite l'évaluation et la validation des résultats obtenus et ouvre la voie à l'évolution des pratiques, notamment par l'amélioration des processus et l'introduction de solutions plus robustes et innovantes. Ainsi, les carnets méthodologiques assurent une flexibilité permettant de s'adapter à l'évolution continue des dynamiques territoriales.

Les carnets méthodologiques sont le fruit de la démarche de coconstruction souhaitée par la CMQuébec pour l'élaboration de son PMAD révisé. Cette démarche, impliquant la collaboration active des différents acteurs du territoire, a mené aux méthodologies présentées et aux divers constats effectués. En centralisant les informations, en suivant les contributions de chacun et en assurant une cohésion dans les actions menées, ces carnets facilitent le dialogue entre les parties prenantes. Ils offrent une base commune de référence qui reflète l'évolution collective du projet et soutiennent un processus collaboratif efficace et inclusif, permettant à chaque participant de partager ses idées et son expertise dans un cadre structuré et transparent. Ainsi, ils constituent une base solide pour les échanges futurs et l'évolution des méthodologies.

Le présent document a pour objectif de présenter la méthodologie élaborée et les données produites sur lesquelles s'appuie le contenu des orientations intégrées au PMADR. Il ne constitue ni un avis juridique ni une orientation officielle de la CMQuébec. Aucune garantie n'est offerte quant à l'exhaustivité des références au Règlement édictant le PMADR de la CMQuébec qui y sont fournies. Pour toutes fins légales, toute personne concernée doit consulter la version officielle du règlement et, le cas échéant, ses amendements.

1. MISE EN CONTEXTE

L'imperméabilisation des sols se définit comme étant l'action d'imperméabiliser les sols en aménageant des surfaces imperméables. Ces surfaces sont composées de matériaux qui ne laissent pas l'eau s'infiltrer dans le sol, comme l'asphalte et le béton. Elle se manifeste notamment par l'aménagement de voies de circulation, de stationnements et de trottoirs, ainsi que par la construction de bâtiments.

L'imperméabilisation des sols entraîne une augmentation des quantités d'eau de ruissellement et une dégradation des écosystèmes aquatiques s'en suit. Selon Schueler (2000)[1], ces conséquences s'observent généralement à partir de taux d'imperméabilisation avoisinant les 10 % dans un bassin versant. Lorsque ces conséquences sont trop importantes, les municipalités doivent assumer des coûts plus élevés, notamment pour les infrastructures en eau ou en raison de l'érosion accrue des rives. Ces coûts sont le reflet de la perte des services écosystémiques autrefois fournis par les milieux naturels ayant été imperméabilisés. Ils pourraient augmenter dans un contexte de changements climatiques et en cas d'urbanisation insuffisamment optimisée, favorisant une artificialisation excessive des sols.

Dans l'objectif de maintenir les services écosystémiques rendus par les milieux naturels dans les bassins versants d'intérêt métropolitain, la CMQuébec s'est dotée de la cible suivante au PMADR :

En 2041, les bassins versants d'intérêt métropolitain qui présentaient un taux d'imperméabilisation inférieur à 10 % en 2024 seront maintenus sous ce seuil, et l'accroissement de leur taux d'imperméabilisation sera inférieur à 25 %.

Ce carnet vise à détailler la méthodologie dont la CMQuébec s'est dotée pour calculer le taux d'imperméabilisation sur le territoire afin de suivre son évolution dans le temps.

1 Schueler, T. 2000. The Importance of Imperviousness: The Practice of Watershed Protection. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD. Pages 7-18

2. MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre les objectifs ambitieux de la CMQuébec en matière de suivi et de gestion de l'imperméabilisation des sols, une méthodologie rigoureuse et reproductible a été élaborée. Cette approche repose sur une combinaison de technologies avancées – notamment l'intelligence artificielle appliquée à l'analyse d'images aériennes – et sur une collaboration étroite avec les partenaires municipaux.

La méthodologie décrite dans cette section vise à assurer une classification et une quantification cohérentes et précises des surfaces imperméables, perméables et partiellement perméables sur l'ensemble du territoire métropolitain. En s'appuyant sur des données aériennes historiques et récentes, elle permet un suivi continu de l'évolution de l'imperméabilisation, tout en intégrant les spécificités locales et les besoins des parties prenantes.

2.1 Démarches de co-construction mises en place

Dans l'objectif de cartographier et quantifier l'imperméabilisation du territoire, la CMQuébec a travaillé sur une méthodologie en co-construction avec un groupe de travail sur le calcul de l'imperméabilisation (ci-après appelé « groupe de travail »), composé d'au moins un représentant de chaque composante de la CMQuébec, à l'exception de la MRC de L'Île-d'Orléans[2].

Le groupe de travail s'est réuni à trois reprises de janvier à avril 2024. Ces rencontres ont permis de discuter de certains choix méthodologiques et d'apporter des ajustements. De plus, cet arrimage avec les composantes a permis d'éviter la duplication des démarches de cartographie de l'imperméabilisation en apportant une harmonisation de la donnée à l'échelle métropolitaine.

2.2 Étapes de la méthodologie

La méthodologie développée par la CMQuébec pour mesurer l'imperméabilisation sur l'ensemble du territoire métropolitain s'appuie sur un niveau élevé de précision, tant au niveau des classes de couverture de sol qu'à celui de la délimitation des surfaces. Elle est aussi reproductible, permettant un suivi continu grâce aux photographies aériennes acquises par la CMQuébec depuis 2003. Par ailleurs, cette approche se révèle cohérente, puisque la source des données et la méthode sont les mêmes pour l'ensemble du territoire métropolitain. Finalement, elle a été élaborée en collaboration avec les partenaires municipaux.

La cartographie de l'imperméabilisation du territoire a été réalisée en 3 grandes étapes :

1. **Production d'un modèle de segmentation sémantique sur image aérienne** : développement d'un modèle d'intelligence artificielle pour analyser et classifier les pixels des photographies aériennes prises en 2021 en fonction de leur type de surface.
2. **Production d'une couverture des sols pour le territoire métropolitain** : génération d'une couverture des sols sur l'ensemble du territoire.
3. **Production d'une matrice d'imperméabilisation des sols** : regroupement des classes de couverture des sols en catégories perméables, imperméables ou partiellement perméables, intégration et validation des résultats en croisant des données complémentaires, et calcul précis du taux d'imperméabilisation.

2 Aucun bassin versant d'intérêt métropolitain ne se trouve sur l'île d'Orléans, ce qui fait que la MRC n'a pas souhaité faire partie des groupes de travail en lien avec la cible mentionnée dans la mise en contexte.

Qu'est-ce que la segmentation sémantique ?

La segmentation sémantique est une tâche de vision par ordinateur qui permet de classer chaque pixel en lui associant une étiquette. Il s'agit d'une sous-catégorie du processus de segmentation d'image, qui permet aux ordinateurs de comprendre les informations visuelles. La segmentation sémantique identifie les ensembles de pixels et les classe en fonction de différentes caractéristiques[3].

Pourquoi avoir utilisé la segmentation sémantique pour cartographier l'imperméabilisation ?

La segmentation sémantique sur image aérienne est efficace pour cartographier l'imperméabilisation des sols, car elle permet une détection précise des surfaces imperméables (p. ex. routes, bâtiments, arbres) à haute résolution, tout en automatisant le processus sur de vastes territoires. Contrairement à l'étiquetage manuel, qui nécessiterait des années de travail, cette approche offre des résultats rapides, cohérents et de hautes qualités, réduisant considérablement les délais et les coûts de traitement.

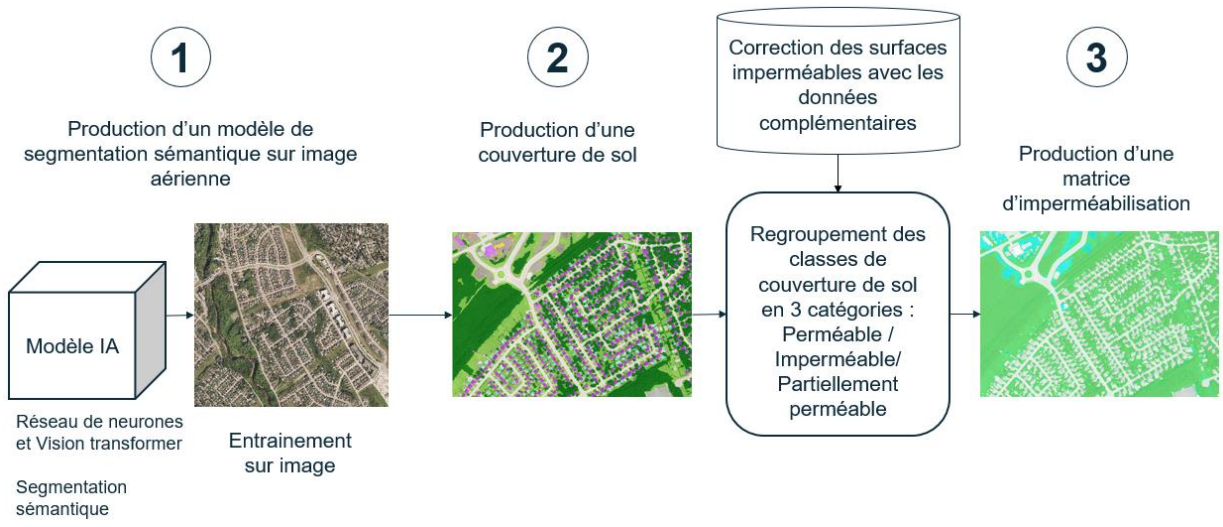
Cette méthodologie a été conçue pour maximiser la qualité et la fiabilité des résultats tout en restant flexible, de manière à pouvoir être adaptée aux évolutions technologiques ou contextuelles futures. Elle illustre également l'engagement de la CMQuébec envers une gestion durable des ressources et une prise de décision basée sur des données scientifiques solides.

Cette matrice permet de quantifier l'imperméabilisation des sols à n'importe quelle échelle, que ce soit pour un bassin versant, une municipalité locale ou régionale, ou même pour une limite de propriété.

Ces trois grandes étapes sont expliquées plus en détail dans les sections suivantes et illustrées schématiquement à la figure 1.

Les étapes 2 et 3 ont été effectuées avec les photographies aériennes de 2021 dans un premier temps. La couverture de sol et la matrice d'imperméabilisation ont été produites également à partir des photographies aériennes prises en 2024.

Figure 1 - Étapes de la cartographie de l'imperméabilisation du territoire métropolitain



3 Qu'est-ce que la segmentation sémantique ? | IBM

2.2.1 Production d'un modèle de segmentation sémantique sur image aérienne

Cette étape initiale constitue le fondement de la méthodologie visant à cartographier et quantifier l'imperméabilisation des sols sur le territoire métropolitain. Elle repose sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour développer un modèle de segmentation sémantique capable de classer chaque pixel des photographies aériennes selon sa nature (bâtiments, routes, végétation, eau, etc.). Ce modèle a été conçu pour garantir une précision élevée, tout en s'adaptant à la diversité des environnements présents sur le territoire.

La production d'un modèle de segmentation sémantique sur image aérienne comprend plusieurs étapes, notamment :

A. La préparation des sites d'entraînement;

B. Le choix et l'entraînement du modèle d'intelligence artificielle;

C. Les performances obtenues pour chaque classe de couverture des sols.

Ces étapes ont permis de poser les bases d'une couverture des sols exhaustive, essentielle pour la suite des analyses.

À noter que les étapes B et C incluent des détails techniques qui nécessitent une certaine expertise pour être pleinement compris. Ces sections décrivent les processus avancés d'apprentissage profond et d'évaluation de la segmentation sémantique, des concepts principalement destinés à un public spécialisé en intelligence artificielle ou en télédétection.

A. Préparation des sites d'entraînement

La préparation des sites d'entraînement constitue une étape essentielle pour garantir un entraînement de haute qualité du modèle de segmentation sémantique. Elle consiste à sélectionner, organiser et annoter des images représentatives du territoire métropolitain. Ces images d'entraînement servent à apprendre au modèle à reconnaître les différentes classes de surfaces visibles sur les photographies aériennes.

Dans cette étape, les actions suivantes ont été réalisées :

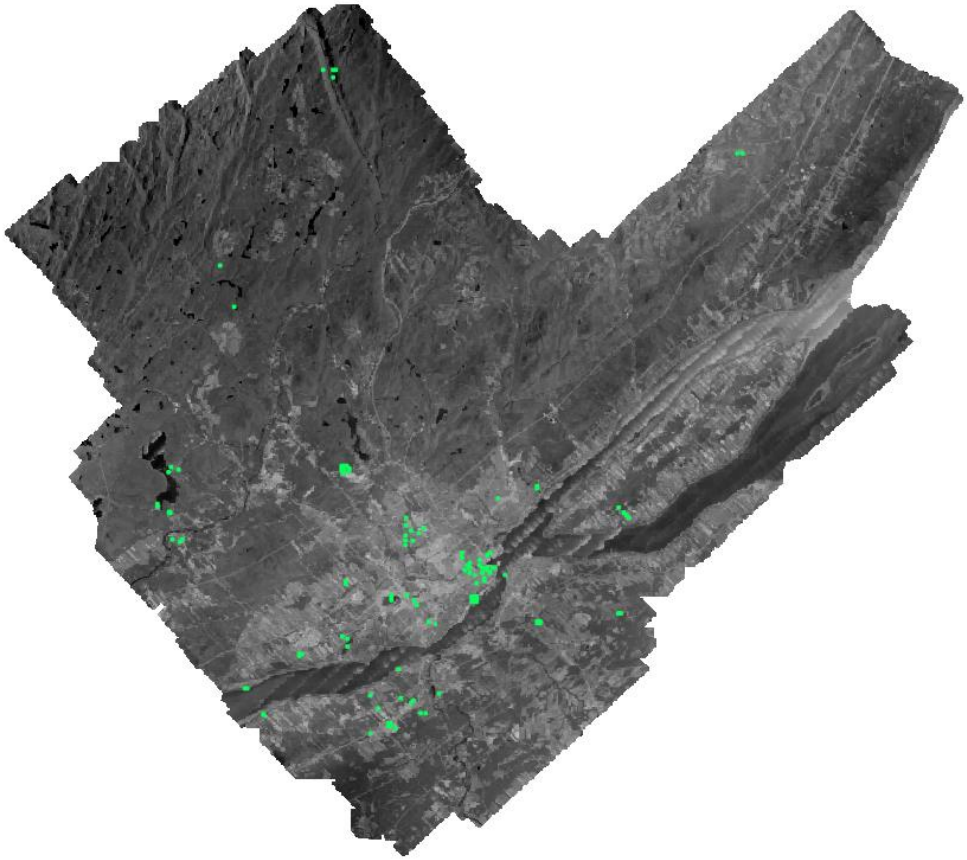
- **Définition des sites d'entraînement :** Au total, 125 sites répartis sur le territoire métropolitain ont été soigneusement sélectionnés (figure 2). Ces sites couvrent une diversité de paysages, incluant des zones urbaines, périurbaines et naturelles, afin d'assurer que le modèle soit capable de généraliser ses prédictions. Ensemble, ces sites représentent environ 780 hectares, soit 0,25 % de la superficie totale du territoire métropolitain.
- **Création des imagettes d'entraînement :** Les photographies aériennes de 2021, capturées avec une résolution 4 de 12 cm, ont été découpées en imagettes de 250 m² pour un traitement plus efficace. Ces imagettes incluent les bandes spectrales proches infrarouges, rouge et vert (NIR-R-G), qui offrent des informations essentielles pour distinguer les différentes classes.
- **Annotation et correction manuelle :** Une segmentation initiale a été réalisée à l'aide d'un modèle préliminaire, puis corrigée manuellement pour produire des masques d'entraînement de haute qualité. Ces masques, également appelés *données étiquetées*, servent de référence pour guider le modèle dans son apprentissage.

4 La résolution d'une image correspond à sa définition spatiale, c'est-à-dire la taille de la plus petite unité de surface que le capteur peut distinguer. Donc, avec une taille de 12 cm, le capteur peut distinguer des objets ou des caractéristiques d'une taille supérieure à 12 cm (p. ex. un bloc de béton, une bouche de réseau pluvial).

Qu’est-ce que l’apprentissage profond (deep learning) en segmentation sémantique ?

Dans le domaine de la segmentation sémantique, l'apprentissage profond, aussi appelé « deep learning » en anglais, consiste à apprendre à un ordinateur à reconnaître et à classer chaque partie d’une image, un peu comme si on lui demandait de colorier une carte en fonction des types de surfaces (routes, bâtiments, arbres, etc.). Pour cela, on lui montre des exemples déjà « coloriés » (annotés) pour qu'il comprenne quoi chercher. Ensuite, l'ordinateur s'entraîne à reproduire ce travail en faisant des essais, en corrigeant ses erreurs, et en s'améliorant à chaque tentative. On évalue sa performance avec des « tests » pour s'assurer qu'il peut bien reconnaître ces surfaces dans des images qu'il n’a jamais vues. Une fois prêt, on l'utilise pour analyser rapidement et précisément de nouvelles images, ce qui économise beaucoup de temps par rapport à un travail manuel.

Figure 2 - Répartition des sites d'entraînement sur le territoire de la CMQuébec



B. Choix et entraînement du modèle d’intelligence artificielle

Après la préparation des données, l’étape suivante consiste à sélectionner l’architecture la plus performante et à l’entraîner pour produire un modèle de segmentation sémantique permettant une prédiction précise et fiable des différentes surfaces de couverture des sols sur l’image aérienne. Après plusieurs essais, le modèle LSKNet-S (Large Selective Kernel Network) s'est révélé être celui offrant la meilleure segmentation et consommant le moins de ressources machines.

C. Les performances obtenues pour chaque classe de couverture des sols

Les résultats obtenus lors de l'entraînement et de la validation de notre modèle de segmentation démontrent la robustesse et l'efficacité du modèle. Pendant la phase d'entraînement, le modèle a atteint un F1-score de 0,973, une mIOU de 0,948, une précision globale (OA) de 0,987, et un coefficient Kappa de 0,825. Ces performances exceptionnelles se sont maintenues lors de la phase de validation, avec un F1-score de 0,98, une mIOU de 0,95, une précision globale de 0,99, et un coefficient Kappa de 0,84.

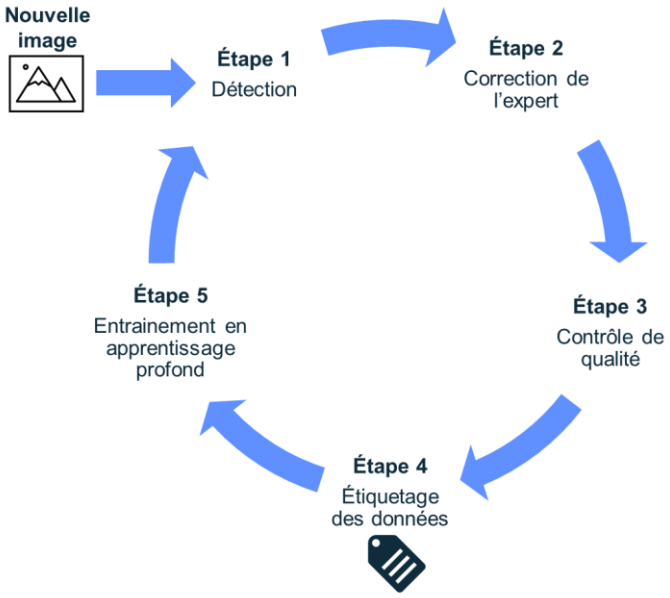
Les résultats détaillés par classe sont également très encourageants :

- Surfaces imperméables : F1-score de 0,997, IOU de 0,993.
- Bâtiments : F1-score de 0,987, IOU de 0,975.
- Arbres : F1-score de 0,985, IOU de 0,970.
- Véhicules : F1-score de 0,947, IOU de 0,900.
- Encombrements : F1-score de 0,951, IOU de 0,906.
- Eau : F1-score de 0,996, IOU de 0,993.
- Piscines : F1-score de 0,972, IOU de 0,945.
- Minéraux : F1-score de 0,975, IOU de 0,951.
- Végétation basse : F1-score de 0,974, IOU de 0,949.
- Haies : F1-score de 0,909, IOU de 0,833.

Dans l'ensemble, les performances du modèle se traduisent par un F1-score de 0,976, une mIOU de 0,954, une précision globale de 0,989, et un coefficient Kappa de 0,836. Ces résultats soulignent la robustesse et l'efficacité du modèle pour une segmentation précise et fiable.

- Entraînement : F1 : 0,973, mIOU : 0,948, OA : 0,987, Kappa : 0,825
- Validation : F1 : 0,98, mIOU : 0,95, OA : 0,99, Kappa : 0,84

Figure 3 - Étapes d'entraînement du modèle



2.2.2 Production d'une couverture de sols pour le territoire métropolitain

L'étape suivante a consisté à produire une cartographie de la couverture des sols pour l'ensemble du territoire métropolitain. La couverture des sols fait référence à ce qui est présent à la surface terrestre, que ce soit la végétation, les infrastructures, l'eau, le sol nu ou autres. Les photographies aériennes ont été classifiées par le modèle de segmentation sémantique selon dix classes de couverture des sols.

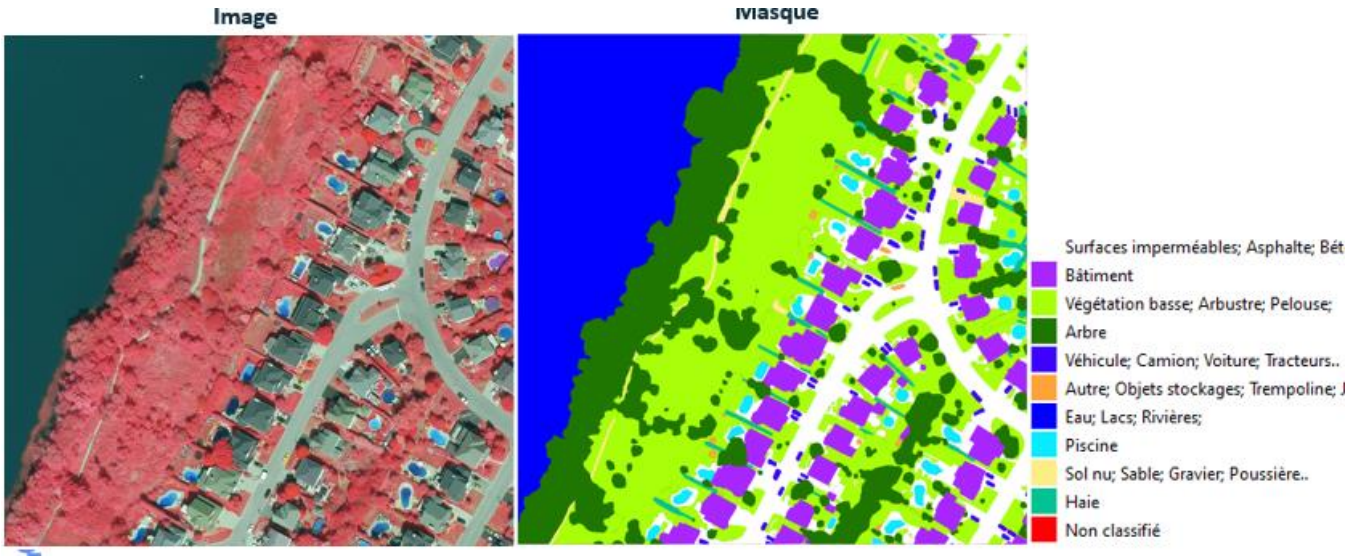
Le tableau 1 présente les classes de couverture de sol, les types de matériaux qui leur sont associés, ainsi que des exemples de surfaces correspondantes.

Tableau 1 - Types de matériaux et de surfaces selon les classes de la couverture de sol

Classes de couverture de sol	Types de matériaux	Types de surfaces
Surface minérale imperméable	Asphalte, béton, pavé, blocs d'aménagement paysager, terrain synthétique	• Route, trottoir, bordures de rue • Allée de stationnement privée ou cours avant • Certains aménagements dans les cours arrière (balcons pourtour des piscines, annexe, serre)
Bâtiment	Tout type de bâtiment	
Véhicule	Tout type de véhicule	
Eau	Cours d'eau, lac, étang, fleuve	
Piscine	Tout type de piscine	
Surface minérale autre	Gravier, sable, roc, sol à nu	• Allée de stationnement privé ou cours avant • Stationnement • Route • Carrière et sablière • Roc naturel, affleurements rocheux • Bordure des cours d'eau • Terrain à usage récréatif • Allée, sentier, etc.
Végétation basse	Herbacée et arbustif	• Cour engazonnée avant et arrière • Terre agricole avec une culture en place • Friche • Végétation qui colonise une surface minérale autre • Terrain de sport en gazon
Arbre	Arbre	• Arbre urbain • Boisé
Haie	Conifère en taille architecturale en milieu urbain	• Haie mitoyenne
Non classifié		
Autre	Matériaux variables	• Objet d'entreposage dans les zones commerciales et industrielles • Objet d'arrière-cour dans les secteurs résidentiels (p. ex. trampoline, modules de jeux, etc.)

La Figure 4 montre une image aérienne avec les bandes de couleur proche infrarouge, rouge et vert d'une petite portion de territoire (à gauche) à partir de laquelle le modèle a généré la classification selon les 10 classes de couverture de sol (à droite) qui ont été choisies.

Figure 4 - Classification d'une image aérienne à partir des bandes de couleur NIR



La couverture de sol a été superposée en transparence à la photographie aérienne de la figure 5 pour illustrer la qualité et la précision des résultats obtenus.

Figure 5 - Couverture de sol en transparence sur une photographie aérienne



2.2.3 Production d'une matrice d'imperméabilisation des sols

Les classes de la couverture des sols ont été réparties selon les trois catégories suivantes : imperméable, perméable ou partiellement perméable au sein d'une matrice préliminaire. La cartographie de l'imperméabilisation correspond à la catégorie imperméable de cette matrice. Une étape de correction a été faite pour produire une matrice finale. Le tableau 2 présente la répartition des classes de couverture de sol par catégorie.

Un prétraitement spécifique est appliqué à certaines classes. Les classes « Autre » et « Véhicule » ont été converties dans la classe dominante qui les entoure. Par exemple, un véhicule sur une route a été transformé pour se retrouver dans la classe « Surface minérale imperméable ». La classe « Eau » est exclue de l'analyse, c'est-à-dire qu'elle n'appartient à aucune catégorie et les superficies associées à cette classe ont été retirées du calcul.

Tableau 2 - Classes de couverture de sol par catégorie pour la matrice d'imperméabilité

Catégorie	Classe	Type de matériel
Imperméable	Surface minérale imperméable	Asphalte, béton, pavé, bloc d'aménagement paysager
	Bâtiment	Tout type de bâtiment
	Piscine	Tout type de piscine
	Surface minérale autre	Route et stationnement de gravier ou de poussière de roche en zone industrielle
Partiellement perméable	Surface minérale autre	Gravier, sable, roc, sol à nu, poussière de roche
Perméable	Végétation basse	Tout type de végétation basse, incluant le gazon
	Arbre	Arbre
	Haie	Arbre et arbuste taillé en haie
Variable	Véhicule	Tout type de véhicule
	Autre	Exemples : un nuage, un panneau publicitaire, une personne ou un animal, etc.
Exclusion	Eau	Cours d'eau, lac, étang, fleuve

Le tableau 2 montre que toutes les superficies du territoire qui se trouvent dans les classes de la couverture de sol qui sont associées à la catégorie imperméable sont utilisées pour cartographier et quantifier l'imperméabilisation sur le territoire métropolitain. Ainsi, le calcul de l'imperméabilisation se fait à partir des superficies associées aux classes suivantes :

- Surface minérale imperméable
- Bâtiment
- Piscine
- Surface minérale autre correspondant à une route ou un stationnement de gravier ou de poussière de roche dans les secteurs industriels

La catégorie perméable regroupe toutes les classes qui correspondent à de la végétation. La catégorie partiellement perméable a été créée pour refléter le fait que certaines surfaces minérales sont constituées de matériaux suffisamment poreux pour laisser l'eau s'infiltrer. Pour cette raison, les surfaces appartenant à cette catégorie ne sont pas incluses dans le calcul de l'imperméabilisation sauf exception. En effet, il peut arriver que ces surfaces correspondent plutôt à des sols trop compacts pour être perméables et qui, de ce fait, produisent autant de ruissellement que les surfaces de la catégorie imperméable. C'est le cas des routes et des stationnements composés de surfaces minérales « autre » dans les secteurs industriels. Ces surfaces ont donc été intégrées au calcul de l'imperméabilisation

2.3 Limite et biais de la méthodologie

La méthodologie employée est inspirée des méthodologies les plus avancées présentées dans la littérature pour mesurer l'imperméabilisation. La télédétection est la méthode la plus souvent employée combinée à des techniques d'intelligence artificielle, particulièrement grâce à des tâches de vision par ordinateur.

Malgré que la méthode s'inscrive dans les pratiques les plus avancées sur le plan technologique pour cartographier les surfaces imperméables, elle comporte tout de même certaines limites. La classification des surfaces est dépendante de la segmentation sémantique effectuée par le modèle. Le modèle classifie les pixels selon le type de surface et le contexte environnant. Ainsi, le modèle ne classe pas les surfaces selon la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol ou selon l'absence d'infiltration. Il ne prend pas non plus en considération les facteurs qui peuvent influencer l'infiltration de l'eau dans le sol comme la pente, le niveau de compaction des sols, la saturation en eau des sols, etc. Par exemple, un stationnement en asphalte perméable sans végétation présente sera tout de même classé comme une surface minérale imperméable par le modèle puis placée dans la catégorie imperméable.

Des corrections ont été apportées pour corriger certains biais, mais les limites demeurent présentes à certains égards. Voici certaines surfaces classées comme imperméables alors que leur taux d'infiltration est supérieur aux surfaces minérales :

- Toitures végétalisées;
- Surfaces constituées de matériaux minéraux (asphalte, béton, pavé, etc.) perméables;
- Certaines surfaces en pavé ou en gravier qui laisse l'eau s'infiltrer, mais que sur l'image aérienne ces surfaces apparaissent comme étant de pavé imperméable ou de l'asphalte. La résolution de l'image (12 cm) reste une limitation niveau de détail pouvant être détecté.

Malgré la résolution fine des images et les bandes spectrales utilisées, le modèle ne parvient pas toujours à distinguer certaines allées de stationnement privées, qu'elles soient en gravier ou en asphalte. Par exemple, du gravier fraîchement étendu peut être incorrectement classé comme de l'asphalte par le modèle.

La méthode pourrait être améliorée en utilisant des images sans feuillage ou des données LiDAR classifiées pour une meilleure segmentation des surfaces imperméables sous le couvert végétal. Il serait aussi possible de continuer à entraîner le modèle sur des jeux de données supplémentaires pour améliorer la performance du modèle.

La méthodologie développée ne permet pas de faire la différence entre les surfaces de la classe « surfaces minérales autres » qui laissent l'eau s'infiltrer et celles qui sont imperméables. Le modèle a donc été entraîné pour faire une meilleure distinction dans les secteurs industriels et des données complémentaires ont été utilisées à l'étape de la correction pour pouvoir placer ces surfaces dans la catégorie imperméable.

3. RÉSULTATS ET CONSTATS

3.1 Résultats

La matrice d'imperméabilité générée à partir de cette méthodologie permet d'obtenir un taux d'imperméabilisation (2021, 2024) à l'échelle du territoire métropolitain. Ce taux peut également être calculé à l'échelle de n'importe quelle unité territoriale du territoire métropolitain. Cette matrice pourra être générée à partir des photographies aériennes prises dans le futur afin de suivre l'évolution de l'imperméabilisation sur le territoire.

Dans le cadre du PMAD révisé, le taux d'imperméabilisation a été calculé à partir de la photographie aérienne de 2024 pour la portion métropolitaine de l'ensemble des bassins versants du territoire afin de sélectionner les bassins versants d'intérêt métropolitain (BVIM) qui sont présentés dans l'orientation 8 du PMADR (voir carnet méthodologique correspondant). Les taux d'imperméabilisation 2024 des bassins versants d'intérêt métropolitain sont présentés aux tableaux 33 et 35 du PMADR.

Les résultats de la méthodologie incluent également la couverture des sols de laquelle il est possible de tirer différentes données dérivées. Parmi les 10 classes de couverture de sol, certaines présentent un intérêt particulier et différentes données dérivées ont été rendues disponibles en données ouvertes[5] :

- Végétation basse détectée par intelligence artificielle
- Eau détectée par intelligence artificielle
- Haies détectées par intelligence artificielle
- Objets arrière-cour détectés par intelligence artificielle
- Empreintes de bâtiments détectées par intelligence artificielle
- Piscines détectées par intelligence artificielle
- Arbres détectés par intelligence artificielle
- Véhicules détectés par intelligence artificielle

3.2 Constats

Les taux d'imperméabilisation des BVIM et des BVIM pour la restauration, issus de calculs préliminaires, ont été présentés aux partenaires. Ces taux sont calculés sur la portion des bassins versants se trouvant sur le territoire métropolitain. Les éléments suivants ont pu être constatés :

- Les taux d'imperméabilisation dans les bassins versants de prises d'eau municipale de surface[6] sont très bas (en dessous de 5 %). Les taux les plus élevés sont de plus de 3 % et se trouvent dans les bassins versants des prises d'eau de la rivière Saint-Charles et du fleuve à Lévis.
- Certains bassins versants d'intérêt métropolitain ont déjà dépassé le seuil des 10 % d'imperméabilisation, ceux-ci couvrent la majorité du territoire de l'Agglomération de Québec. Il s'agit des bassins versants suivants : de la rivière du Cap Rouge, de la rivière Saint-Charles, de la rivière Beauport.
- Malgré un nombre élevé de piscines sur le territoire, les taux d'imperméabilisation attribuables aux piscines sont minimes.
- Le bassin versant de la rivière Chaudière ne dépasse pas le seuil de 10 % d'imperméabilisation, mais s'en approche.

5 Communauté métropolitaine de Québec - Organisations - Données Québec (donneesquebec.ca)
6 Il s'agit de la portion du bassin versant qui alimente en eau la prise d'eau potable et qui est donc située en amont de celle-ci.

3.3 Lien avec le PMAD

Deux cibles ont été établies dans le PMADR en lien avec l'imperméabilisation :

- En 2041, les bassins versants d'intérêt métropolitain qui présentaient un taux d'imperméabilisation inférieur à 10 % en 2024 seront maintenus sous ce seuil, et l'accroissement de leur taux d'imperméabilisation sera inférieur à 25 %.
- En 2041, la couverture végétale sera augmentée dans les bassins versants d'intérêt métropolitain pour la restauration dont le taux d'imperméabilisation mesuré en 2024 était supérieur ou égal à 10 % et inférieur à 25 %.

Le taux d'imperméabilisation est un indicateur permettant de suivre la première cible, mais également une donnée permettant d'évaluer certains critères pour la sélection des BVIM (voir carnet méthodologique sur les BVIM).

4. SUIVI

Le taux d'imperméabilisation a été calculé à partir de photographies aériennes de 2024. Les indicateurs suivants seront calculés à partir de la méthodologie décrite dans ce carnet :

- Taux d'imperméabilisation des bassins versants d'intérêt métropolitain (portion métropolitaine) ;
- Pourcentage d'augmentation du taux d'imperméabilisation des bassins versants d'intérêt métropolitain ;
- Taux de couverture végétale dans les bassins versants d'intérêt métropolitain pour la restauration dont le taux d'imperméabilisation mesuré en 2024 était supérieur ou égal à 10 % et inférieur à 25 % (portion située à l'intérieur du territoire de la CMQuébec).

5. INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

Si vous avez besoin d'information complémentaire, veuillez nous écrire à l'adresse suivante : info@cmquebec.qc.ca et indiquez dans l'objet : *Demande d'information : Carnet méthodologique*.

Votre demande sera lue et analysée par un membre de notre équipe et une réponse vous sera acheminée dans un délai raisonnable.

RÉFÉRENCES

Garioud, A., De Wit, A., Poupée, M., Valette, M., Giordano, S., & Wattrelos, B. (2023). FLAIR# 2 : textural and temporal information for semantic segmentation from multi-source optical imagery. arXiv preprint arXiv:2305.14467.

Wang, L., Li, R., Duan, C., Zhang, C., Meng, X., & Fang, S. (2022). A novel transformer based semantic segmentation scheme for fine-resolution remote sensing images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5.

Wang, L., Li, R., Zhang, C., Fang, S., Duan, C., Meng, X., & Atkinson, P. M. (2022). UNetFormer : A UNet-like transformer for efficient semantic segmentation of remote sensing urban scene imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 190, 196-214.

Yamazaki, K., Hanyu, T., Tran, M., Garcia, A., Tran, A., McCann, R., ... & Le, N. (2023). AerialFormer: Multi-resolution Transformer for Aerial Image Segmentation. arXiv preprint arXiv:2306.06842.

Osco, L. P., Wu, Q., de Lemos, E. L., Gonçalves, W. N., Ramos, A. P. M., Li, J., & Junior, J. M. (2023). The segment anything model (sam) for remote sensing applications: From zero to one shot. arXiv preprint arXiv:2306.16623.

Li, Y., Hou, Q., Zheng, Z., Cheng, M. M., Yang, J., & Li, X. (2023). Large selective kernel network for remote sensing object detection. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (pp. 16794-16805).

LSH. (n.d.). Modèles préentraînés pour la télédétection. GitHub. Récupéré de https://github.com/lsh1994/remote_sensing_pretrained_models

Esertel, E. (n.d.). Cartographie LULC utilisant des images WV3 avec des méthodes d'apprentissage profond. GitHub. Récupéré de https://github.com/esertel/LULCMapping-WV3images-CORINE-DLMethods

Cui, C. (n.d.). Segmentation d'images aériennes. GitHub. Récupéré de https://github.com/cuicaihao/aerial-image-segmentation

Satellite Image Deep Learning. (n.d.). *Techniques pour l'apprentissage profond des images satellites*. GitHub. Récupéré de https://github.com/satellite-image-deep-learning/techniques

MDPI. (2022). Titre de l'article. Mathematics, 14(5), 906. Récupéré de https://www.mdpi.com/2073-8994/14/5/906

Communauté métropolitaine de Québec

CARNET MÉTHODOLOGIQUE

Imperméabilisation des sols