

Rapport de recherche (R2269)

CARBONATURE : MODÈLE D'ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE À L'ÉCHELLE DES MUNICIPALITÉS DU QUÉBEC

Remis à la Société pour la Nature et les Parcs, section Québec (SNAP Québec)

Mars 2025



Institut national
de la recherche
scientifique

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2025
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-925559-06-1 (version numérique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2025

COORDINATION, CONCEPTION, ANALYSES ET RÉDACTION

Maxime Fortin Faubert, Ph. D., Stagiaire postdoctoral - Centre ETE de l'INRS

Émilie Pastore, Stagiaire de premier cycle - Centre ETE de l'INRS

Rachid Lhissou, Associé de recherche - Centre ETE de l'INRS

Kaushik Roy, Étudiant au doctorat - Centre ETE de l'INRS

Aliyeh Rasooli Zadeh, Ph. D., Professionnelle de recherche - Centre ETE de l'INRS

DIRECTION

Louise Hénault-Ethier, Ph. D., Professeure associée - Centre ETE de l'INRS

Karem Chokmani, Ph. D., Professeur titulaire - Centre ETE de l'INRS

Saeid Homayouni, Ph. D., Professeur titulaire - Centre ETE de l'INRS

Anne Ola, Ph. D., Professeure adjointe - Centre ETE de l'INRS

REMERCIEMENTS

Daniel Alvarez, Géomaticien - Service de la gestion du territoire de la Ville de Victoriaville

Mathieu Vallée, Chef de division - Développement durable de la Ville de Varennes

Diego Creimer, Directeur - Finance et Biodiversité à la SNAP Québec

Jean-Philippe Lemay, Avocat - SNAP Québec

Boutaina El Jai, Conseillère partenariat valorisation - Centre ETE de l'INRS

Pablo Poitier-Miali, Stagiaire - Centre ETE de l'INRS

CITATION SUGGÉRÉE

Fortin Faubert, M., Pastore, E., Lhissou, R., Roy, K., Rasooli Zadeh, A., Homayouni, S., Chokmani, K., Ola, A. et Hénault-Ethier, L. 2025. *CarboNature : Modèle d'estimation des stocks de carbone à l'échelle des municipalités du Québec*. Rapport de recherche (R2269). Centre Eau Terre Environnement, Institut national de la recherche scientifique (INRS), Québec. 42 p.

La réalisation de cette étude a été rendue possible grâce à la contribution financière de la Société pour la Nature et les Parcs, section Québec (SNAP Québec).



Pour toute demande de renseignements, veuillez communiquer avec l'une des personnes responsables à la SNAP Québec ou à l'INRS :

Diego Creimer, Directeur - Finance et Biodiversité à la SNAP Québec
diego@snapquebec.org
4126, Saint Denis, Bureau 300,
Montréal, QC, H2W2M5
(514) 278-7627

Louise Hénault-Ethier, Ph. D., Professeure associée - Centre ETE de l'INRS
Louise.Henault-Ethier@inrs.ca
490, rue de la Couronne
Québec, QC, G1K9A9
(514) 713-6839

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Les municipalités sont appelées à jouer un rôle important dans la conservation des milieux naturels et la lutte aux changements climatiques, notamment à travers la planification de l'aménagement du territoire. Le développement d'outils réglementaires basés sur des principes d'écofiscalité constitue l'une des avenues prometteuses pour assurer le financement des mesures de conservation et de mise en valeur des infrastructures naturelles qui contribuent à la capture et à la séquestration du carbone sur le territoire. Cependant, l'utilisation d'outils cartographiques nécessaires à cette planification n'est pas toujours démocratisée, en partie à cause des coûts parfois prohibitifs liés au recrutement d'experts en géomatique ou à l'acquisition de données pertinentes pour chaque territoire.

Mandatée par la SNAP Québec, une équipe de l'INRS a travaillé sur la conception d'un modèle d'estimation des stocks de carbone à l'échelle des municipalités du Québec, basée sur des données géospatiales gratuites et facilement accessibles. Dans ce contexte, une revue de littérature a permis d'identifier et de sélectionner des données récentes, gratuites, accessibles, et de qualité, pour réaliser une cartographie détaillée des territoires municipaux. Au total, 16 classes d'occupation des sols ont été définies et subdivisées en quatre catégories de canopée pour mieux capturer la variabilité des paysages.

Les meilleures valeurs d'estimation des stocks de carbone pour chaque milieu ont été colligées à partir de la littérature scientifique, en privilégiant les études réalisées dans le sud du Québec, dans l'est du Canada et dans des régions tempérées. Quatre compartiments ont été retenus pour dresser le portrait du carbone stocké à l'échelle municipale : le sol, la biomasse aérienne, la biomasse souterraine et la biomasse morte.

Le modèle a été appliqué avec succès sur les municipalités de Varennes et de Victoriaville, ce qui a permis d'obtenir des valeurs d'estimations de stocks de carbone sur leur territoire. Le modèle repose sur des principes scientifiques récents et robustes, mais certaines limites doivent être considérées pour interpréter les résultats adéquatement.

Le modèle pourra éventuellement être intégré dans un outil libre d'accès, tel que R ou QGIS, pour être facilement utilisé par l'ensemble des municipalités du Québec qui souhaitent estimer les quantités de carbone stockées sur leur territoire et identifier les zones à fort potentiel de conservation. Cette initiative soutient la gestion environnementale et les politiques de développement durable, en offrant aux municipalités un cadre stratégique pour augmenter le stockage de carbone localement. Le présent rapport constitue une étape importante vers des pratiques de gestion durable et d'écofiscalité, tout en encourageant de futures recherches pour optimiser l'estimation des stocks de carbone à l'échelle locale.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF.....	4
TABLE DES MATIÈRES	5
LISTE DES TABLEAUX	6
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	7
INTRODUCTION	9
MÉTHODOLOGIE.....	11
<i>Principe de base</i>	11
<i>Collecte de données spatiales</i>	12
<i>Zone d'étude</i>	13
<i>Cartographie des catégories de canopée</i>	14
Indice de végétation.....	15
Modèle de hauteur de canopée (MHC).....	15
<i>Cartographie des classes d'occupation des sols</i>	16
<i>Modélisation des stocks de carbone dans les différents compartiments</i>	17
Carbone organique du sol (COS)	17
Carbone de la biomasse aérienne (CBA)	19
Carbone de la biomasse souterraine (CBS)	22
Carbone de la biomasse morte (CBM)	23
<i>Modélisation des stocks de carbone totaux</i>	23
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	24
<i>Cartographie des catégories de canopée</i>	24
<i>Cartographie des classes d'occupation des sols</i>	24
<i>Modélisation des stocks de carbone dans les différents compartiments</i>	27
<i>Modélisation des stocks de carbone totaux</i>	31
CONCLUSION	34
RÉFÉRENCES.....	35
ANNEXE.....	40

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Données géospatiales utilisées.....	12
Tableau 2. Numéros de feuillets du SQRC concernés pour les villes de Varennes et Victoriaville.....	13
Tableau 3. Catégories de canopée et exemples d'éléments identifiés.	14
Tableau 4. Classes d'occupation des sols cartographiées.	16
Tableau 5. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de COS.....	17
Tableau 6. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de CBA.....	19
Tableau 7. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de CBS.	22
Tableau 8. Stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Varennes.	32
Tableau 9. Stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.	32
Tableau S1. Liste des CUBF qui composent chaque classe d'usage prédominant.....	40
Tableau S2. Résumé des valeurs utilisées pour chaque compartiment.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cartographie des catégories de canopée pour la ville de Varennes.....	25
Figure 2. Cartographie des catégories de canopée pour la ville de Victoriaville.....	25
Figure 3. Cartographie des classes d'occupation des sols pour la municipalité de Varennes.....	26
Figure 4. Cartographie des classes d'occupation des sols pour la municipalité de Victoriaville.....	26
Figure 5. Cartographie du COS à l'échelle de la municipalité de Varennes.....	27
Figure 6. Cartographie du COS à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.	27
Figure 7. Cartographie du CBA à l'échelle de la municipalité de Varennes.	28
Figure 8. Cartographie du CBA à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.	28
Figure 9. Cartographie du CBS à l'échelle de la municipalité de Varennes.....	29
Figure 10. Cartographie du CBS à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.....	29
Figure 11. Cartographie du CBM à l'échelle de la municipalité de Varennes.....	30
Figure 12. Cartographie du CBM à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.....	30
Figure 13. Cartographie des stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Varennes.....	31
Figure 14. Cartographie des stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.....	31

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

(Les termes en italique sont en anglais.)

ALL	Code qui englobe les trois catégories de végétation (i.e., VEB, VEM et VEH)
BCI	Bureau de coopération interuniversitaire
BDPPAD	Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées
CBA[]	Valeur de l'estimation des stocks de carbone de la biomasse aérienne (tC/ha)
CBA	Carbone de la biomasse aérienne
CBM	Carbone de la biomasse morte
CBS	Carbone de la biomasse souterraine
CMHPQ	Cartographie des milieux humides potentiels du Québec
CMM	Communauté métropolitaine de Montréal
COS	Carbone organique du sol
CSRS	<i>Canadian Spatial Reference System</i> [Système de référence spatiale canadien]
CTOT	Carbone total
CUBF	Codes d'utilisation des biens-fonds
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
EPSG	<i>European Petroleum Survey Group</i> [Groupe européen de géodésie pétrolière]
FADQ	Financière agricole du Québec
FGDB	<i>File Geodatabase</i> [Fichier Géodatabase]
F _{IPCC}	Facteur de variation de l'IPCC
GPKG	<i>GeoPackage</i> [Format GeoPackage]
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
GES	Gaz à effet de serre
ha	Hectare
i.e.,	C'est-à-dire
IFN[]	Valeur de l'estimation des stocks de carbone de l'Inventaire forestier national (tC/ha)
IFN	Inventaire forestier national
INRS	Institut national de la recherche scientifique
IPBES	<i>Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> [Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques]
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> [GIEC - Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat]
JP2	Format JPEG 2000
kgC/m ²	Kilogramme de carbone par mètre carré
LiDAR	<i>Light Detection and Ranging</i> [Détection et télémétrie par la lumière]
MAMH	Ministère des Affaires municipales et de l'Habitation du Québec
Mbc-sfc3	Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien 3
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs du Québec
MERN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
MHC	Modèle de Hauteur de Canopée
MP.IFN[]	Moyenne pondérée des estimations de l'IFN (tC/ha)
MRNF	Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec
MTM	<i>Modified Transverse Mercator</i> [Mercator transverse modifiée]
NAD83	<i>North American Datum 1983</i> [Système de référence nord-américain de 1983]
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> [Indice de végétation par différence normalisée]
NIR	<i>Near Infrared</i> [Proche infrarouge]
NQ	Nature Québec
NVE	Non végétale
PropEmP	Proportion de l'empreinte paysagère

QGIS	<i>Quantum geographic information system</i> [Système d'information géographique Quantum]
REF[]	Valeur de référence (tC/ha)
RGB	<i>Red-Green-Blue</i> [Rouge-Vert-Bleu]
R-G-B-NIR	<i>Red-Green-Blue-Near Infrared</i> [Rouge-Vert-Bleu-Proche Infrarouge]
R:P	Ratio racines:pousses
SFN	Solutions fondées sur la nature
SHP	<i>Shapefile</i> [Fichier de formes]
SIG	Système d'information géographique
SISCan	Service canadien d'information sur les sols
SNAP	Société pour la Nature et les Parcs
SQRC	Système québécois de référence cartographique
t/ha	Tonnes par hectare
tC	Tonnes de carbone
tC/ha	Tonnes de carbone par hectare
TIF	<i>Tagged Image File Format</i> [Format de fichier d'image étiquetée]
VDVI	<i>Visible-band Difference Vegetation Index</i> [Indice de végétation par différence des bandes visibles]
VEB	Végétation Basse
VEH	Végétation Haute
VEM	Végétation Moyenne

INTRODUCTION

Les changements climatiques et la crise de biodiversité font partie des enjeux environnementaux les plus pressants de notre époque (IPBES, 2022; IPCC, 2022). L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) entraîne des bouleversements dans les régimes climatiques, provoquant des événements météorologiques extrêmes plus fréquents et des perturbations écologiques importantes (IPCC, 2022). Les changements climatiques, ainsi que les changements dans l'utilisation des terres et des mers, la pollution, l'exploitation directe des ressources naturelles, l'introduction d'espèces exotiques envahissantes, sont les cinq principaux facteurs identifiés par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) pour alimenter la perte de biodiversité (IPBES, 2022). L'interaction entre ces deux crises amplifie leurs effets respectifs, ce qui menace la santé des écosystèmes, les économies et la qualité de vie des populations à l'échelle mondiale.

Face à ces défis, les villes et les collectivités locales se retrouvent en première ligne, avec une responsabilité accrue pour mettre en place des actions concrètes et adaptées à leur contexte, afin de renforcer leur résilience urbaine et contribuer à l'effort global de réduction des émissions de GES et de protection de la biodiversité (Gouvernement du Québec, 2024; MELCCFP, 2022). Dans cette perspective, les solutions fondées sur la nature (SFN) offrent une voie prometteuse pour les villes désireuses de participer activement à la lutte aux changements climatiques tout en améliorant la qualité de vie de leurs habitants (Gouvernement du Québec, 2024; Griscom et al., 2017). Ces solutions incluent toutes actions visant à protéger, gérer ou restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés, ainsi qu'à aménager des infrastructures phytotechnologiques qui permettent de valoriser et de renforcer les services écosystémiques (Fortin Faubert et al., 2023; Gouvernement du Québec, 2024).

Au Québec, les SFN sont devenues une composante clé des documents stratégiques municipaux liés aux enjeux climatiques et à la perte de biodiversité, car elles peuvent offrir des bénéfices multiples, comme le stockage du carbone, la réduction des îlots de chaleur urbains, l'amélioration de la gestion des eaux pluviales, l'accroissement de la biodiversité, l'amélioration de la qualité de vie et du bien-être et l'atténuation des nuisances (Fortin Faubert et al., 2023). Les municipalités ont un potentiel significatif pour encourager la mise en place de SFN par le biais de réglementations locales adaptées à leurs besoins environnementaux et socio-économiques (Laterreur et al., 2022). En établissant des réglementations qui favorisent l'aménagement d'espaces verts, la protection de la biodiversité urbaine, et la gestion durable des ressources, elles peuvent transformer les villes en espaces résilients et agréables, tout en contribuant à l'atteinte des objectifs globaux de l'Accord de Paris en matière de climat, signé en 2015 (UNFCCC, 2015) et de l'Accord de Kunming-Montréal pour la biodiversité, signé en 2022 (CBD, 2022). L'écofiscalité représente un réel pouvoir de taxation parmi ceux dont disposent les municipalités pour encourager ou dissuader certains comportements sur leur territoire (Jolin-Dahel, 2024). Toutefois, les décideurs ont besoin d'outils robustes pour évaluer les besoins locaux et mesurer l'efficacité réelle des actions mises en place. En s'appuyant sur des analyses solides, les municipalités peuvent ajuster leurs stratégies pour optimiser les bénéfices de leurs actions.

La Ville de Varennes et la ville de Victoriaville avaient antérieurement participé au projet en *Mode Solution Nature* porté par la Société pour la Nature et les Parcs, section Québec (SNAP Québec) et Nature Québec (NQ), qui visait à faire connaître le potentiel des écosystèmes dans la mitigation et l'adaptation aux changements climatiques sur le territoire québécois (Guyon, 2022). Face à l'urgence de s'attaquer aux crises interreliées des changements climatiques et de la perte de biodiversité, les deux municipalités, en collaboration avec la SNAP Québec, se sont

ensuite lancées dans un vaste chantier visant à utiliser au maximum le pouvoir de la réglementation et de la taxation des municipalités québécoises pour protéger la nature et le climat (Ville de Varennes, 2023). Dans le cadre de ce nouveau projet, portant le nom de *CarboNature*, les deux municipalités modèles souhaitaient passer à une autre étape pour développer des mesures écofiscales ou réglementaires visant à accroître le stockage de carbone sur leur territoire. Afin d'appuyer la prise de décision, il paraissait nécessaire que les municipalités se dotent d'outils robustes pour identifier les infrastructures naturelles qui y contribuent, afin de pouvoir par la suite valider l'efficacité des mesures mises en place.

La SNAP Québec a donc mandaté une équipe de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS), afin de concevoir un modèle d'estimation des stocks de carbone basé sur des données gratuites, relativement facile d'utilisation, adapté aux conditions locales et applicable sur l'ensemble des municipalités du Québec. Le premier objectif du mandat visait à réaliser une revue de littérature pour évaluer la disponibilité des données nécessaires à l'élaboration d'une cartographie détaillée et raffinée des municipalités. Le second objectif visait à établir une liste de facteurs de conversion pour estimer les quantités de carbone stockées, en tonne de carbone par hectare (tC/ha), dans les différentes municipalités.

Le modèle développé pourra éventuellement être implanté dans un outil libre d'accès, tels que R ou QGIS permettant à la SNAP Québec d'inciter d'autres municipalités à l'utiliser. Ces dernières pourront s'approprier l'outil pour que leur service de géomatique puisse répliquer les analyses et identifier les zones à fort potentiel de séquestration de carbone, guider les politiques de gestion environnementale et appuyer les décisions stratégiques en matière d'aménagement durable.

MÉTHODOLOGIE

Principe de base

La méthodologie présentée dans le présent rapport avait pour objectif de dresser le portrait des stocks de carbone sur le territoire des municipalités québécoises. L'estimation devait prendre en compte la complexité des facteurs qui influencent la capacité de stockage du carbone, qui varient selon les caractéristiques spécifiques aux différentes classes d'occupation des sols (IPCC, 2006a). La composition végétale, le type de sol, la topographie et les conditions climatiques sont des exemples de facteurs qui ont de l'influence sur les quantités de carbone stockées dans un milieu (Crockett et al., 2023; Dawud et al., 2016; Lal et al., 2012; Magnan et al., 2023; Shaw et al., 2015; Srour et al., 2024). À l'intérieur d'un écosystème terrestre, la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, la biomasse morte, la litière et le sol, fonctionnent comme les principaux puits de carbone et ont des capacités de stockage très différentes (Mukul et al., 2020).

Il existe plusieurs approches terrain et modèles qui permettent d'estimer la quantité de carbone stockée dans différents milieux tels que les forêts, les terres agricoles, les prairies, les zones humides et les terres urbaines (Nowak, 2021). Toutefois, les résultats qui en découlent sont souvent spécifiques à un seul type d'occupation des sols, car les dynamiques de stockage diffèrent considérablement d'un milieu à l'autre. De plus, pour être utilisées avec précision, ces approches nécessitent généralement la collecte de nombreuses données sur le terrain, ce qui peut être complexe, coûteux et chronophage. En raison de la spécificité des résultats qui en découlent et de la quantité de données nécessaires, ces approches sont difficiles à appliquer à grande échelle, comme celle d'une municipalité. Une évaluation globale des stocks de carbone à cette échelle nécessite des approches plus généralistes qui se basent sur des modèles spatiaux, et qui intègrent des coefficients issus de la littérature scientifique.

À cet effet, une revue de littérature a été réalisée afin de dresser une liste de caractéristiques biologiques (i.e., catégories de canopée) et territoriales (i.e., classes d'occupation des sols) à inclure dans le modèle, ainsi que pour comptabiliser les meilleures valeurs pour considérer l'influence des caractéristiques incluses sur les quantités de carbone stockées. Pour assurer la représentativité des données au niveau des municipalités québécoises, l'information retenue a préférentiellement été sélectionnée parmi des travaux réalisés au sud Québec, dans l'est du Canada ou dans des régions tempérées en fonction de leur disponibilité.

Collecte de données spatiales

Les données géospatiales utilisées dans le présent modèle ont été obtenues gratuitement en consultant différentes bases de données ouvertes, telles que le portail provincial « Données Québec », le portail du Gouvernement du Québec « Forêts Ouvertes », la base de données du *Service canadien d'information sur les sols* « SISCan », la plateforme de diffusion de données cartographiques de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM) « Observatoire Grand Montréal », ainsi que la version académique de la plateforme partagée de données géospatiales et de photographies aériennes des universités québécoises « Géoindex » (**Tableau 1**).

Tableau 1. Données géospatiales utilisées.

Données	Descriptions	Format ¹	Année ²	Source ³
Découpages administratifs	Délimitation spatiale des municipalités, territoires non organisés et territoires autochtones du Québec.	SHP	2023	Données Québec - MRNF
Usages prédominants	La base de données illustre les 16 grandes classes d'usages prédominants présents sur le territoire tel qu'inscrit au rôle d'évaluation foncière des municipalités. Le Tableau S1 présente la liste des codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) qui composent chaque classe d'usage prédominant.	SHP	2023	Géoindex - MAMH
Périmètre urbain	Délimitation spatiale du périmètre urbain issu du plus récent plan d'urbanisme qui concerne la municipalité (CMM, 2012; Victoriaville, 2019).	SHP	2012 – Varennes 2019 - Victoriaville	Observatoire Grand Montréal - CMM Données municipales - Victoriaville
Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD)	Contour des parcelles agricoles qui ont été associées aux dossiers des clients de la Financière agricole du Québec (FADQ).	SHP	2024	Données Québec - Financière Agricole
Milieux humides potentiels	Cartographie des milieux humides potentiels du Québec (CMHPQ).	FGDB	2023	Données Québec - MELCCFP
Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)	Délimitation spatiale du réseau hydrographique du Québec.	SHP	2019	Données Québec - MRNF
Biomasse et carbone forestiers du Québec méridional	Jeu de données issues de la Carte écoforestière originale et résultats d'inventaire courants qui regroupent différentes données écoforestières fournissant de l'information se rattachant directement aux peuplements forestiers.	SHP	2024	Données Québec - MRNF
Base de données sur le carbone organique dans les sols	Base de données qui décrit les relations entre le sol et la teneur en carbone.	SHP	1996	SISCan
Décennal-C 2018 Décennal-C 2019	Mosaïques d'orthophotographies RGB découpées en feuillets selon le SQRC. Celles-ci résultent d'un assemblage de photos aériennes RGBI.	JP2 0,2 m	2018 – Varennes 2019 - Victoriaville	Géoindex - MERN
Modèles de hauteur de canopée (MHC)	Produits dérivés du LiDAR générés dans le cadre du projet d'acquisition de données à l'échelle provinciale.	TIF 1 m	2017 à 2019 - Varennes 2022 - Victoriaville	Données Québec - MRNF

¹ SHP: Shapefile, FGDB: File Geodatabase, TIF: Tagged Image File Format, JP2: JPEG 2000 - Joint Photographic Experts Group 2000. ² L'année indiquée correspond à l'acquisition des données et non à leur publication. ³ Les liens de téléchargement des jeux de données sont accessibles en cliquant sur la référence dans la colonne « Source ».

Dans le cadre du présent travail, ce sont les données d’occupation du territoire « Usages prédominants », ainsi que les mosaïques d’orthophotographies « Décennal-C » qui ont été obtenues en consultant la version académique de la plateforme « Géoindex ». Une version publique de Géoindex est également disponible, mais celle-ci offre des fonctionnalités limitées et un nombre de couches restreint. Malheureusement, les données d’occupation du territoire et les mosaïques d’orthophotographies font partie des données qui ne sont pas disponibles pour les collaborateurs non universitaires. Les municipalités devront donc obtenir ces données autrement. Le jeu de données « Usages prédominants », illustre l’utilisation actuelle des unités d’évaluation sur le territoire du Québec, tel qu’inscrit au rôle d’évaluation foncière des municipalités. Les municipalités peuvent donc consulter leur propre base de données pour dresser le portrait des usages prédominants sur leur territoire. Le **Tableau S1** présente la liste des codes d’utilisation des biens-fonds (CUBF) qui composent chacune des 16 classes d’usages prédominants. Les mosaïques d’orthophotographies obtenues sur Géoindex sont fournies pour les fins exclusives de l’enseignement ou de la recherche universitaire dans le cadre d’une entente conclue entre le Bureau de coopération interuniversitaire (BCI) et le ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles (MERN) du Québec. Les municipalités québécoises peuvent aussi accéder à certaines données géospatiales du MERN via la Géoboutique Québec du MERN, sous réserve des conditions d’utilisation applicables. Elles peuvent contacter le MERN pour vérifier les options d’accès selon leurs projets.

Les données géospatiales ont été transformées, traitées, analysées et mises en forme à l’aide du logiciel R, version 4.3.1 (R Core Development Team, 2023), du logiciel Quantum GIS, version 3.34.1 (QGIS Development Team, 2023), ou du logiciel ArcGIS Pro, version 2.8 (ESRI Ltd., Redlands, USA). Ces traitements peuvent être réalisés à l’aide de tout autre logiciel de système d’information géographique (SIG), dont plusieurs sont disponibles en libre accès. Les résultats cartographiques pour les deux municipalités modèles (i.e., Varennes et Victoriaville) ont été projetés dans le système de coordonnées de référence NAD83 (CSRS) / MTM zone 8 (EPSG:2950). Le **Tableau 2** présente les numéros de feuillets du Système québécois de référence cartographique (SQRC) utilisés pour sélectionner certains jeux de données à télécharger dans chaque ville à l’étude (MRNF, 2024a).

Tableau 2. Numéros de feuillets du SQRC concernés pour les villes de Varennes et Victoriaville.

Villes	Numéros de feuillets du SQRC
Varennes	31H11NO, 31H11SO
Victoriaville	31I01SE, 21L04SO

Zone d’étude

Le modèle d’estimation des stocks de carbone a été conçu pour s’appliquer à l’échelle des municipalités du Québec. Dans le cadre du présent rapport, ce modèle a été déployé sur les territoires administratifs de Varennes et de Victoriaville, qui sont les deux municipalités partenaires du projet *CarboNature*. Les limites administratives officielles des municipalités ont été extraites en format vectoriel (SHP) en filtrant leur nom sous le champ « MUS_NM_MUN » de la couche des découpages administratifs du MRNF. La délimitation spatiale de chaque municipalité a ensuite servi de base pour découper l’ensemble des données spatiales utilisées dans le modèle.

Cartographie des catégories de canopée

La cartographie des catégories de canopée visait à identifier différents types de végétations qui présentent des capacités de stockage du carbone distinctes (**Tableau 3**). Cette nouvelle couche de canopée devait être créée en amont, puisqu'elle sera utilisée dans les prochaines étapes pour subdiviser les grandes classes d'occupation des sols en quatre catégories de canopée.

La première catégorie de canopée retenue correspond à la portion du territoire qui est non végétale (NVE). Celle-ci est essentiellement représentée par des surfaces aquatiques ou minérales, comme des roches, du béton, du sable, des routes, des stationnements et des bâtiments. Elle vise à identifier les espaces du territoire qui contribuent très peu, voire pas du tout, au stockage du carbone. La deuxième catégorie de canopée correspond à la végétation basse (VEB), dont la hauteur est inférieure à 0,3 mètre. Cette catégorie vise essentiellement à identifier les plantes herbacées annuelles et vivaces (i.e., non ligneuses), dont la biomasse est relativement éphémère et qui se décompose et se régénère annuellement ou sur quelques années (IPCC, 2006b). La troisième catégorie correspond à la végétation moyenne (VEM), dont la hauteur varie entre 0,3 et 3 mètres. Elle vise à identifier la biomasse associée aux plantes ligneuses arbustives. La quatrième catégorie correspond à la végétation haute (VEH), dont la hauteur est supérieure à 3 mètres, et vise à identifier la biomasse des arbres. La biomasse des plantes ligneuses arbustives et des arbres peut accumuler de grandes quantités de carbone durant leur durée de vie (IPCC, 2006b). Les seuils de hauteur des différentes catégories de végétation peuvent varier d'une étude à l'autre et doivent être interprétés avec souplesse, en particulier la hauteur minimale d'une catégorie et la hauteur maximale d'une autre, qui peuvent varier et donc se chevaucher (CMM, 2017; Fortin Faubert et Huet, 2024; IPCC, 2006c).

Tableau 3. Catégories de canopée et exemples d'éléments identifiés.

Catégories de canopée	Codes	Seuils de hauteur	Exemples
Non-végétal	NVE	Toutes les hauteurs	Roches, béton, terre, sable, routes, stationnements, bâtiments, etc.
Végétation basse	VEB	< 0,3 mètre	Pelouses, mousses, herbes aromatiques, plantes à fleurs, potagers, etc.
Végétation moyenne	VEM	0,3 à 3 mètres	Arbustes et petits arbres
Végétation haute	VEH	> 3 mètres	Arbres et grands arbustes

La méthodologie proposée pour cartographier les quatre catégories de canopée repose sur l'utilisation d'images multispectrales, pour identifier l'ensemble des zones non végétal (NVE) et végétales, puis sur l'utilisation d'un modèle de hauteur de canopée (MHC) issu des données Lidar disponibles gratuitement sur le portail Forêts Ouvertes du Gouvernement du Québec, qui permet de mesurer la hauteur du couvert végétal, pour ainsi distinguer les différentes catégories de canopée (i.e., VEB, VEM et VEH) selon les seuils de hauteur définis.

Les images multispectrales peuvent provenir de diverses sources, telles que les satellites Sentinel-2 ou Landsat-9, qui se distinguent par une fréquence de revisite (i.e., temps nécessaire pour revenir au même point) relativement élevée (i.e., quelques jours), avec des bandes rouge, verte, bleue et proche infrarouge (R-G-B-NIR, pour *Red-Green-Blue-Near infrared* en anglais) de résolution spatiale de 10 et 30 mètres, respectivement (ESA, 2012; NASA, 2020). D'autres options incluent des données recueillies par des capteurs multispectraux aéroportés, qui offrent des images d'une résolution spatiale beaucoup plus fine (< 1 mètre), et donc mieux adaptée pour l'étude d'un plus petit territoire, mais dont la fréquence de prise d'images est souvent moins élevée (i.e., quelques années) (Données Québec, 2024).

Indice de végétation

Le MERN fait l'acquisition de photos aériennes R-G-B-NIR, afin de couvrir différentes régions administratives de la province (i.e., Estrie, Lanaudière, Laurentides, Laval, Montréal et Montérégie). À partir de ces photos, le MERN produit des mosaïques d'orthophotos numériques couleur R-G-B, ayant une résolution de 0,2 m, et découpées en feuillets selon le SQRC (Décennal-C 2018). Puisque ces mosaïques n'incluent pas la bande NIR des photos originales, elles n'ont pas pu être utilisées pour calculer l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI, pour *Normalized Difference Vegetation Index* en anglais) qui est un indice de végétation spécialisé et calculé à partir de la bande proche infrarouge (NIR) et de la bande rouge (R) à travers l'équation suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Ces mosaïques ont tout de même été utilisées pour calculer l'Indice de Végétation par Différence dans les Bandes Visibles (VDVI, pour *Visible-band Difference Vegetation Index* en anglais), qui est un autre indice de végétation calculé uniquement à partir des bandes visibles du spectre lumineux (i.e., R, G et B) à travers l'équation suivante :

$$VDVI = \frac{2 * G - R - B}{2 * G + R + B} \quad (2)$$

Le VDVI est un peu moins précis que le NDVI, mais il est beaucoup plus accessible que ce dernier. Il permet de différencier la végétation des surfaces non végétales, comme les sols nus ou les infrastructures minéralisées et il est largement utilisé pour analyser la santé et la densité de la végétation à partir d'images aéroportées de haute résolution, en particulier lorsque la bande NIR n'est pas disponible (Guo et Chen, 2024; Xu et al., 2020). Le VDVI est exprimé sur une échelle allant de -1 à 1. Les valeurs négatives proches de -1 sont généralement associées aux nuages, à l'eau ou à des surfaces minérales, telles que des roches, du béton, du sable ou du sol nu. En revanche, les valeurs positives proches de 1 indiquent une forte probabilité de végétation saine et dense, car la bande verte est fortement réfléchiée par la végétation. La valeur seuil qui permet de distinguer la végétation peut varier selon plusieurs facteurs, tels que la saison, l'heure de la journée et la zone d'étude, mais elle est généralement proche de 0 (Wang et al., 2015). Dans les deux villes étudiées, la valeur seuil a été déterminée après plusieurs essais et validations visuelles, puis une nouvelle couche des surfaces végétales a été générée pour chacune d'elles.

Modèle de hauteur de canopée (MHC)

La nouvelle couche qui identifie les surfaces végétales a ensuite été superposée au MHC du MRNF, afin de distinguer les trois différentes catégories de canopée (i.e., VEB, VEM et VEH) selon les seuils de hauteur définis (**Tableau 3**). Avant de procéder à la superposition des données, les valeurs des pixels du MHC correspondant aux emprises des lignes électriques à haute tension ont dû être corrigées. Les valeurs initiales des pixels identifiés ont été remplacées par la valeur modale (valeur plus fréquente) des pixels environnants, calculés dans une fenêtre de 3x3 pixels (ou kernel de 3x3). Cette étape visait à réduire les biais causés par la présence d'infrastructures non végétales au-dessus de surfaces végétales, et ainsi obtenir une estimation de la hauteur de végétation plus représentative.

Cartographie des classes d'occupation des sols

La cartographie des classes d'occupation des sols visait à identifier et à délimiter les classes d'occupation du territoire qui présentent des capacités de stockage du carbone distinctes. Le **Tableau 4** présente les 16 classes qui ont été intégrées dans le modèle, ainsi que les caractéristiques qui les décrivent et les données utilisées pour les identifier et les délimiter.

Tableau 4. Classes d'occupation des sols cartographiées.

Classes d'occupation des sols	Descriptions	Données utilisées
Agricole - Cultivée	Inclus les parcelles cultivées qui ont été associées aux dossiers des clients de la Financière agricole du Québec (FADQ).	Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD).
Agricole - Non cultivée	Inclus les parties de lots à usage agricole de la couche Usages prédominants qui ne sont pas cultivées selon les dossiers des clients de la FADQ.	Usages prédominants & Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD)
Perturbation paysagère - Élevée	Inclus les lots à usage: Commercial; Exploitation minière et service connexe; Industrie lourde; Industrie légère; Restauration et hébergement; Service; Sans correspondance; Transport et infrastructure; Institutionnel et Résidentiel institutionnel, de la couche Usages prédominants. Inclut également les lots à usage Résidentiel de la couche Usages prédominants qui se situent à l'intérieur du périmètre urbain selon la couche Périmètre urbain.	Usages prédominants & Périmètre urbain
Perturbation paysagère - Faible	Inclus les lots à usage: Parc et récréation; Terrain vague; Pêche, chasse, piégeage et activité connexe et Forestier, de la couche Usages prédominants. Inclut également les lots à usage Résidentiel de la couche Usages prédominants qui se situent à l'extérieur du périmètre urbain selon la couche Périmètre urbain.	Usages prédominants & Périmètre urbain
Aquatique - Lac	Inclus uniquement les Lacs identifiés dans la GRHQ.	Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)
Forestier - Autre couvert forestier	Corresponds au couvert forestier qui n'a pas été identifié dans la carte écoforestière de l'IFN (2016). Le couvert forestier appartient à toutes les zones de végétation haute dont la superficie excède un demi-hectare. Celui-ci peut être identifié à partir de la Cartographie des catégories de canopée et ne se limite pas uniquement au périmètre urbain.	(IFN, 2016) & Catégories de canopée
Forestier - Forêt de conifères	Inclus les forêts de conifères identifiées dans la carte écoforestière de l'IFN (2016).	Biomasse et carbone forestiers du Québec méridional
Forestier - Forêt mixte	Inclus les forêts mixtes identifiées dans la carte écoforestière de l'IFN (2016).	Biomasse et carbone forestiers du Québec méridional
Forestier - Forêt de feuillus	Inclus les forêts de feuillus identifiées dans la carte écoforestière de l'IFN (2016).	Biomasse et carbone forestiers du Québec méridional
Humide - Marais	Inclus les marais, mais aussi les prairies humides et les eaux peu profondes, identifiées dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Marécage	Inclus tous les types de marécage identifiés dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Tourbière ouverte minérotrophe	Inclus les tourbières ouvertes minérotrophes (fen) identifiées dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Tourbière ouverte ombrotrophe	Inclus les tourbières ouvertes ombrotrophes (bog) identifiées dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Tourbière ouverte indifférenciée	Inclus les tourbières ouvertes indifférenciées identifiées dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Tourbière boisée	Inclus les tourbières boisées identifiées dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels
Humide - Autre	Inclus les complexes palsiques et les milieux humides indifférenciés identifiés dans la cartographie des milieux humides potentiels du Québec.	Milieux humides potentiels

Le **Tableau 1** peut être consulté pour obtenir plus de détails concernant les données utilisées pour identifier et délimiter les différentes classes d'occupation des sols.

Modélisation des stocks de carbone dans les différents compartiments

Le sol, la biomasse aérienne, la biomasse souterraine et la biomasse morte sont les quatre compartiments qui ont été retenus pour estimer les stocks de carbone dans les différentes classes d'occupation des sols étudiées.

Carbone organique du sol (COS)

Le **Tableau 5** présente les valeurs et formules utilisées pour estimer les stocks de carbone organique du sol (COS) sous chaque catégorie de canopée qui subdivise les différentes classes d'occupation des sols du modèle proposé. La plupart des estimations sont basées sur des valeurs de références, correspondant aux quantités moyennes de carbone de la couche active (30 cm supérieurs) de la zone terrestre des polygones de pédopaysage de la *Base de données sur le carbone organique dans les sols du Canada* du SISCan (<https://sis.agr.gc.ca/siscan/>) (Tarnocai et Lacelle, 1996). La valeur de l'attribut « SCARBON » de la couche « CARBON » a été multipliée par 10, afin de convertir l'unité d'origine (kgC/m²) en tC/ha, avant d'être utilisée comme valeur de référence (REF[]). Les valeurs de référence ont été conservées dans les quatre milieux forestiers (i.e., autre couvert forestier, forêt de conifères, forêt mixte et forêt de feuillus), ainsi que dans la sous-classe « Autre » des milieux humides.

Tableau 5. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de COS.

Classes d'occupation des sols	Codes Canopée	Références	Valeurs (tC/ha)
Agricole - Cultivée	ALL	(Tarnocai et al., 1996); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00
	VEB	(Tarnocai et al., 1996); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *0,82
Agricole - Non cultivée	VEM	(Tarnocai et al., 1996); (Drexler et al., 2021)	REF[] +17
	VEH	(Tarnocai et al., 1996); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00
Perturbation paysagère - Élevée	VEB	(Tarnocai et al., 1996); (Robinson et al., 2023); (IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.2)	REF[] *1,14 *(1 -1,0) +(0,5 *REF[]) *1,14 *1,0
	VEM	(Tarnocai et al., 1996); (Robinson et al., 2023); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00 *(1 -1,0) +(0,5 *REF[]) *1,00 *1,0
	VEH	(Tarnocai et al., 1996); (Robinson et al., 2023); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00 *(1 -0,1) +(0,5 *REF[]) *1,14 *0,1
Perturbation paysagère - Faible	VEM	(Tarnocai et al., 1996); (Robinson et al., 2023); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00 *(1 -0,1) +(0,5 *REF[]) *1,00 *0,1
	VEH	(Tarnocai et al., 1996); (Robinson et al., 2023); (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5)	REF[] *1,00 *(1 -0,1) +(0,5 *REF[]) *1,00 *0,1
Aquatique - Lac	ALL	(Ferland et al., 2012)	230
Forestier - Autre couvert forestier Forestier - Forêt de conifères Forestier - Forêt mixte Forestier - Forêt de feuillus	ALL	(Tarnocai et al., 1996)	REF[]
Humide - Marais	ALL	(Magnan et al., 2023)	89,23
Humide - Marécage	ALL	(Goyette et al., 2024)	175
Humide - Tourbière ouverte minérotrophe	ALL	(Goyette et al., 2024)	1010
Humide - Tourbière ouverte ombrotrophe	ALL	(Goyette et al., 2024)	1320
Humide - Tourbière ouverte indifférenciée	ALL	(Goyette et al., 2024)	1165
Humide - Tourbière boisée	ALL	(Goyette et al., 2024)	425
Humide - Autre	ALL	(Tarnocai et al., 1996)	REF[]

Le code ALL englobe les trois catégories de végétation (i.e., VEB, VEM, VEH). La catégorie non végétale (NVE) a été retirée du tableau puisque toutes les valeurs étaient nulles.

Dans le cas des lacs, des marais, des marécages, et des quatre types de tourbières, les valeurs de références ont tout simplement été remplacées par un facteur de conversion générique issu de la littérature. La valeur de 230 tC/ha attribuée aux lacs correspond à une moyenne des stocks de carbone estimés dans les sédiments de 13 lacs boréaux du nord du Québec (Ferland et al., 2012). La valeur de 89,23 tC/ha attribuée aux marais correspond à une moyenne des estimations réalisées sur 6 marais du sud du Québec et 12 marais du Nouveau-Brunswick (Magnan et al., 2023, Table S4). Les valeurs de 175, 1010, 1320 et 425 tC/ha attribuées aux marécages, aux tourbières ouvertes minérotrophes, aux tourbières ouvertes ombrotrophes et aux tourbières boisées, correspondent à des moyennes d'estimations réalisées dans 57 zones humides du sud-est du Canada (Goyette et al., 2024). La portion racinaire a été soustraite des estimations présentées dans (Goyette et al., 2024), puisque celles-ci portaient sur l'ensemble du carbone souterrain. La valeur de 1165 tC/ha attribuée aux tourbières ouvertes indifférenciées correspond à la moyenne des valeurs attribuées aux tourbières ouvertes minérotrophes et ombrotrophes.

Dans les milieux agricoles (i.e., cultivée et non cultivée), les facteurs de variation de l'IPCC ont été multipliés aux valeurs de références pour estimer les stocks de COS (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5). Le facteur de 1 appliqué à l'ensemble des surfaces agricoles cultivées correspond au facteur de variation de l'IPCC recommandé pour les terres labourées. Les facteurs de 0,82 et 1, appliqués à la VEB et à la VEH des terres agricoles non cultivées correspondent aux facteurs de variation de l'IPCC recommandé pour les terres mises en réserve et pour les cultures d'arbres pérennes à long terme telles que les arbres fruitiers. Sur des terres agricoles, Drexler et al. (2021) ont estimé que l'établissement de haies en milieux agricoles avait le potentiel d'augmenter les stocks de COS de 17 tC/ha. Cette valeur a donc été additionnée aux zones de VEM en milieu agricole non cultivé.

Dans le cas des deux classes de perturbation paysagère (i.e., élevée et faible), les facteurs de variation de l'IPCC ont été intégrés dans une formule inspirée de Robinson et al. (2023) qui considère l'empreinte paysagère pour estimer les stocks COS. Il a été supposé que les sols sous la VEB contiennent des stocks de carbone supérieurs à la valeur de référence d'un facteur 1,14 (IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.2) et que ceux sous la VEM et la VEH contenaient des stocks de carbone équivalent (facteur de 1) aux cultures d'arbres vivaces à long terme (IPCC, 2006, V4, Ch5, Table 5.5). Lors des phases de développement et de construction, la couche supérieure du sol est généralement retirée, puis une partie de celle-ci est replacée dans les zones du site qui doivent être végétalisées (Robinson et al., 2023). Il a été estimé que ces zones recevaient généralement une couche de 15 cm de sol superficiel ayant une teneur en carbone réduite de 50 % par rapport aux terres agricoles. Les zones de perturbation paysagère élevée ont donc été considérées entièrement paysagées (100 %), alors que les zones de perturbation paysagère faible ont été considérées partiellement paysagées (10 %). Les stocks de COS ont ainsi été estimés à travers l'équation suivante :

$$COS = REF[] * F_{IPCC} * (1 - PropEmP) + (0,5 * REF[]) * F_{IPCC} * PropEmP \quad (3)$$

où REF[] est la valeur de référence; F_{IPCC} est le facteur de variation de l'IPCC et PropEmP est la proportion de l'empreinte paysagère.

Carbone de la biomasse aérienne (CBA)

Le **Tableau 6** présente les valeurs utilisées pour estimer les stocks de carbone dans la biomasse végétale aérienne (CBA) de chaque catégorie de canopée qui subdivise les différentes classes d'occupation des sols.

Tableau 6. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de CBA.

Classes d'occupation des sols	Codes canopée	Références	Valeurs (tC/ha)
Agricole - Cultivée	ALL	-	0
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
Agricole - Non cultivée	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	25,5
	VEH	(Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	Canopée urbaine[]
Perturbation paysagère - Élevée	VEB	(Dürr et al., 2005)	2,10
	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	25,5
Perturbation paysagère - Faible	VEH	(Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	Canopée urbaine[]
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
Perturbation paysagère - Faible	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	25,5
	VEH	(Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	Canopée urbaine[]
Aquatique – Lac	ALL	-	0
Forestier - Autre couvert forestier	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	25,5
Forestier - Forêt de conifères	VEH	(MRNF, 2024b)	MP.IFN[]
Forestier - Forêt mixte	VEH		IFN[]
Forestier - Forêt de feuillus	VEH		IFN[]
Humide - Marais	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
Humide - Marécage	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
Humide - Marécage	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]
Humide - Tourbière ouverte minérotrophe	VEB	(Goyette et al., 2024)	0
	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
Humide - Tourbière ouverte ombrotrophe	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
Humide - Tourbière ouverte indifférenciée	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]
Humide - Tourbière boisée	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
Humide - Tourbière boisée	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4)	1,13
Humide - Autre	VEM	(Boudreau et al., 2008, Table 5)	16,75
	VEH	(MRNF, 2024b) ou (Estimation municipale) ou (Steenberg et al., 2023)	IFN[] ou MP.IFN[] ou Canopée urbaine[]

Le code ALL englobe les trois catégories de végétation (i.e., VEB, VEM, VEH). La catégorie non végétale (NVE) a été retirée du tableau puisque toutes les valeurs étaient nulles. La valeur attribuée à la Canopée urbaine est celle calculée par la municipalité (si disponible), sinon elle correspond à 45,87 tC/ha.

Pour la canopée urbaine (i.e., VEH qui ne fait pas partie d'un couvert forestier), les stocks de CBA ont été estimés à partir d'un facteur de conversion de 45,87 (tC/ha) qui a été estimé par Steenberg et al. (2023) dans les plaines mixtes du QC. La valeur présentée dans leurs travaux (57,8 tC/ha) incluait les stocks de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine. Puisque la portion souterraine sera considérée dans la prochaine étape du modèle, celle-ci a été retirée à l'aide de la formule suivante : $(CBA = 57,8 / (1 + 0,26))$, sachant que le ratio racine:pousse (R:P) appliqué était de 0,26:1 (Nowak et al., 2008). Le facteur de conversion pour estimer les stocks de CBA de la canopée urbaine pourrait être remplacé par un facteur spécifiquement calculé pour la municipalité si celle-ci dispose de données plus détaillées.

Les stocks de CBA de la VEH dans les forêts de conifères, forêts de feuillus et forêts mixtes, ont été estimés à partir de la couche vectorielle « vue_peup_biomasse_carbone_pee_ori », dont l'attribut « c_arbv_tot » présente les valeurs CBA à l'hectare (tC/ha) pour chaque classe d'entités polygonales des peuplements de la carte écoforestière originale. Cette couche est incluse dans le GeoPackage (GPKG) associé aux numéros de feuillet du SQRC désiré (**Tableau 2**). Les valeurs présentées sur cette carte ont été calculées par le MRNF en utilisant différents modèles de prédiction (MRNF, 2024c). Les stocks de CBA de la VEH du couvert forestier qui n'a pas été identifié par l'IFN (i.e., autre couvert forestier) ont été estimés à partir de la moyenne pondérée des stocks de CBA des forêts identifiées par l'IFN. La moyenne pondérée de l'IFN (MP.IFN) a donc été calculée de la façon suivante :

$$MP.IFN = \frac{\sum(\omega_i * IFN_i)}{\sum \omega_i} \quad (4)$$

où ω_i représente la superficie associée à la portion de chaque classe d'entités polygonales des peuplements i qui se trouve à l'intérieur des limites administratives et IFN_i correspond à la valeur de CBA pour chaque classe d'entités polygonales des peuplements i .

Les stocks de CBA de la VEH de tous les milieux humides chevauchés par une entité polygonale des peuplements de la carte écoforestière ont été estimés à partir des valeurs de carbone forestiers de l'IFN, alors que ceux chevauchés par une entité polygonale d'un autre couvert forestier ont été estimés à partir de la moyenne pondérée des estimations du contenu en carbone forestier. Autrement, c'est la valeur de la canopée urbaine (45,87 tC/ha ou valeur municipale) qui a été appliquée à la VEH des milieux humides ne faisant pas partie d'un couvert forestier.

Des facteurs des conversions issues de la littérature ont été appliqués à la VEB et VEM des différentes classes d'occupation des sols pour estimer les stocks de CBA. La valeur de 1,13 tC/ha, appliquée à la VEB de certaines classes d'occupation des sols, correspond à la valeur par défaut de l'IPCC pour la biomasse sèche aérienne dans les prairies en zone tempérée froide et humide (2,4 t/ha) (IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.4), multipliée par la valeur par défaut de l'IPCC pour la fraction de carbone dans la biomasse herbacée (0,47) (IPCC, 2006a). La valeur de 2,10 tC/ha, appliquée à la VEB dans les zones de perturbation paysagère élevée, correspond à la valeur moyenne de biomasse sèche aérienne (4,476 t/ha) produite par le Pâturin des prés (*Kentucky bluegrass* en anglais, *Poa pratensis L.*) en conditions québécoises (Dürr et al., 2005), multipliées par la fraction de carbone dans la biomasse herbacée (0,47) (IPCC, 2006a). Cette espèce de graminée semblait être la plus représentative de la végétation basse des zones de perturbation paysagère élevée, puisqu'elle est de loin la plus employée pour l'implantation des pelouses au Québec (Fortin Faubert et al., 2024).

La valeur de 25,5 tC/ha, appliquée à la VEM de certaines classes d'occupation des sols, correspond à la valeur moyenne de biomasse sèche aérienne (50,99 t/ha) de petits et grands arbustes des forêts de feuillus du nord et des forêts mixtes du nord (Boudreau et al., 2008, Table 5), multipliées par la valeur par défaut de l'IPCC pour la fraction de carbone dans la biomasse ligneuse (0,50) (IPCC, 2006a). La valeur de 16,75 tC/ha, appliquée à la VEM des milieux humides, correspond à la valeur moyenne de biomasse sèche aérienne (33,49 t/ha) d'arbustes de milieux humides des forêts de feuillus du nord et des forêts mixtes du nord (Boudreau et al., 2008, Table 5), multipliée par la valeur par défaut de l'IPCC pour la fraction de carbone dans la biomasse ligneuse (0,50) (IPCC, 2006a).

La méthodologie proposée ne prend pas en compte les rendements agricoles pour l'estimation des stocks de carbone. Bien que les cultures agricoles absorbent une grande quantité de carbone atmosphérique via la photosynthèse, la biomasse produite (i.e., aérienne et souterraine) n'est généralement pas considérée comme un réservoir à long terme, puisque la majeure partie du carbone fixé est rapidement relâchée dans l'atmosphère lors de la décomposition des résidus de récolte et lors de la consommation des aliments. La biomasse agricole est donc soumise à un cycle de carbone plus court, ce qui limite sa contribution durable au stockage de carbone.

Carbone de la biomasse souterraine (CBS)

La biomasse végétale souterraine est reconnue pour être corrélée de manière allométrique à la biomasse végétale aérienne (Li et al., 2003). La contribution de la biomasse végétale souterraine aux stocks de carbone a donc été calculée en multipliant les estimations des stocks de CBA par des ratios racines:pousses (R:P) issues de la littérature. Le **Tableau 7** présente les ratios R:P utilisés dans le présent modèle pour estimer les stocks de carbone de la biomasse végétale souterraine (CBS) dans chaque catégorie de canopée qui subdivise les différentes classes d'occupation des sols.

Tableau 7. Valeurs utilisées pour estimer les stocks de CBS.

Classes d'occupation des sols	Codes canopée	Références	Valeurs (R:P)
Agricole - Cultivée	ALL	-	-
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
Agricole - Non cultivée	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Cairns et al., 1997)	CBA[] *0,26
Perturbation paysagère - Élevée	VEB	(Dziamski et al., 2007)	CBA[] *5,70
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Cairns et al., 1997)	CBA[] *0,26
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
Perturbation paysagère - Faible	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Cairns et al., 1997)	CBA[] *0,26
	ALL	-	-
Aquatique - Lac	ALL	-	-
Forestier - Autre couvert forestier	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
Forestier - Forêt de conifères	VEH	(Cairns et al., 1997)	CBA[] *0,26
Forestier - Forêt mixte	VEH	(Sothe et al., 2022)	CBA[] *0,222
Forestier - Forêt de feuillus	VEH	(Cairns et al., 1997)	CBA[] *0,26
Forestier - Forêt de feuillus	VEH	(Sothe et al., 2022)	(CBA[] ^{0,615}) *1,576
	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
Humide - Marais	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875
Humide - Marécage	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875
Humide - Tourbière ouverte minérotrophe	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
Humide - Tourbière ouverte ombrotrophe	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875
Humide - Tourbière ouverte indifférenciée	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875
Humide - Tourbière boisée	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875
Humide - Autre	VEB	(IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1)	CBA[] *4,00
	VEM	(Axe et al., 2017)	CBA[] *0,94
	VEH	(Goyette et al., 2024)	CBA[] *0,1875

Les valeurs représentent les ratios racines:pousses (R:P). Le code ALL englobe les trois catégories de végétation (i.e., VEB, VEM, VEH). La catégorie non végétale (NVE) a été retirée du tableau puisque toutes les valeurs étaient nulles.

Un ratio R:P de 4,00:1 a été appliqué aux estimations de CBA de la VEB de la majorité des classes d'occupation des sols pour estimer les stocks de CBS. Cette valeur correspond à la valeur par défaut de l'IPCC pour les herbacés des prairies en zone tempérée froide et humide (IPCC, 2006, V4, Ch6, Table 6.1). Seuls les stocks de CBS de la VEB située en zones de perturbation paysagère élevée ont été estimés à l'aide d'un ratio R:P de 5,70:1, correspondant à la moyenne des ratios R:P estimée sur différentes variétés de *P. pratensis* (Dziamski et al., 2007, Table 2). Le ratio R:P de 0,94:1 appliqué à toute la VEM, provient d'une estimation réalisée sur des haies par Axe et al., (2017) et a été repris dans les travaux de Drexler et al., (2021).

La plupart des stocks de CBS de la VEH ont été estimés à l'aide d'un ratio R:P de 0,26:1 qui provient des travaux de Cairns et al. (1997) et qui est largement utilisé pour l'évaluation des services écosystémiques des forêts urbaines (Nowak, 2021; Nowak et al., 2008). Les quantités de CBS de la VEH des forêts de conifères et des forêts de feuillus ont été estimées à partir d'équations allométriques développées par Li et al. (2003), qui sont maintenant utilisées dans différents modèles de références, tels que le Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (Mbc-sfc3) pour convertir la biomasse aérienne en biomasse souterraine (Kull et al., 2016).

Les stocks de CBS de la VEH en milieux humides ont été estimés à l'aide d'un ratio R:P de 0,1875:1. Celui-ci a été obtenu en divisant la quantité moyenne de carbone stocké dans la biomasse souterraine (1.5 kgC/m²) par la quantité moyenne de carbone stocké dans la biomasse aérienne (8 kgC/m²) d'arbres analysés dans différents marécages et tourbières boisées du Québec (Goyette et al., 2024).

Carbone de la biomasse morte (CBM)

La quantité de carbone de la biomasse morte (CBM) en zones forestières (i.e., autre couvert forestier, forêt de conifères, forêt mixte et forêt de feuillus) peut être estimée par une relation linéaire avec le CBA telle que présentée dans Sothe et al. (2022). Cette relation a été développée à partir des informations sur la masse des petits arbres morts (DHP < 9.0 cm) et des grands arbres morts (DHP ≥ 9.0 cm), par rapport à la biomasse aérienne de l'archive complète des données de l'IFN (2009). Il est important de noter que pour estimer la quantité de CBM, le calcul doit être réalisé à partir des estimations du CBA comme suit :

$$CBM = 0,0603 * CBA[] + 3,7437 \quad (5)$$

Modélisation des stocks de carbone totaux

La cartographie des 4 catégories de canopée a été superposée à la cartographie des 16 grandes classes d'occupation des sols, afin de générer une nouvelle couche raster ayant 64 codes numériques uniques permettant d'identifier les différentes combinaisons possibles de catégories de canopée par classes d'occupation des sols (voir **Tableau S2** en annexe). Les coefficients et ratios R:P issus de la littérature ont ensuite été appliqués aux différentes catégories de canopée dans chaque classe d'occupation des sols pour estimer les stocks de carbone dans les différents puits (i.e., COS, CBA, CBS et CBM). Une superposition finale des cartes de chaque puits a été effectuée afin de générer une dernière carte qui dresse le portrait du carbone total stocké à l'échelle municipale.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cartographie des catégories de canopée

Les produits cartographiques des catégories de canopée obtenus à partir des mosaïques d'orthophotos numériques couleur R-G-B et du MHC sont présentés pour les villes de Varennes et de Victoriaville dans la **Figure 1** et la **Figure 2**, respectivement.

La déduction du type de couverture végétale terrestre suggère que les zones NVE, ainsi que les zones de VEB, de VEM et de VEH occupent des proportions respectives de 31,19 %, 28,48 %, 22,63 % et 17,69 % à Varennes et de 19,51 %, 41,92 %, 10,37 % et 28,20 % à Victoriaville. Malgré de nombreux essais et validations visuelles pour trouver le seuil optimal de VDVI, certaines erreurs d'identification de la couverture végétale persistent. Des surfaces minérales situées dans des zones ombragées peuvent avoir été interprétées comme de la végétation, alors que des zones faiblement végétalisées ont pu ne pas être identifiées ainsi. Par ailleurs, l'utilisation de photographies aériennes introduit un effet de perspective qui peut avoir entraîné une sous-identification des zones de VEB et de VEM situées à proximité de bâtiments ou d'autres structures élevées (Fortin Faubert et al., 2024).

Cartographie des classes d'occupation des sols

Les produits cartographiques des classes d'occupation des sols sont présentés pour les villes de Varennes et de Victoriaville dans la **Figure 3** et la **Figure 4**, respectivement.

La cartographie de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent, réalisée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) en collaboration avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), aurait pu être utilisé pour identifier certaines classes d'occupation des sols, puisqu'elle recense déjà plusieurs catégories pertinentes pour le modèle étudié (Allard et al., 2018). Bien que ce jeu de données ait le potentiel de simplifier la cartographie des différentes classes d'occupation des sols, les informations qu'il contient sont de sources diverses et risquent de ne pas être entièrement à jour. L'utilisation de données d'origine pour cartographier les différentes classes d'occupation des sols nécessite certes plus de manipulations que l'exploitation d'un produit existant, mais elle garantit des résultats plus actuels et précis.

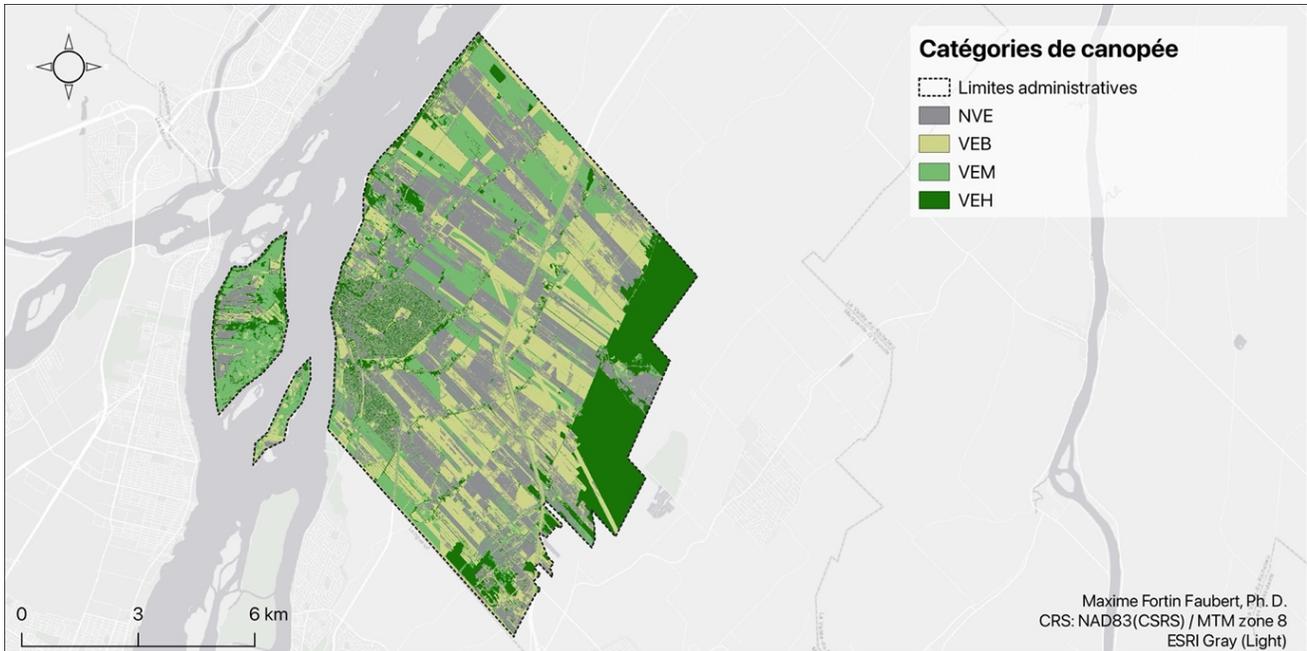


Figure 1. Cartographie des catégories de canopée pour la ville de Varennes.

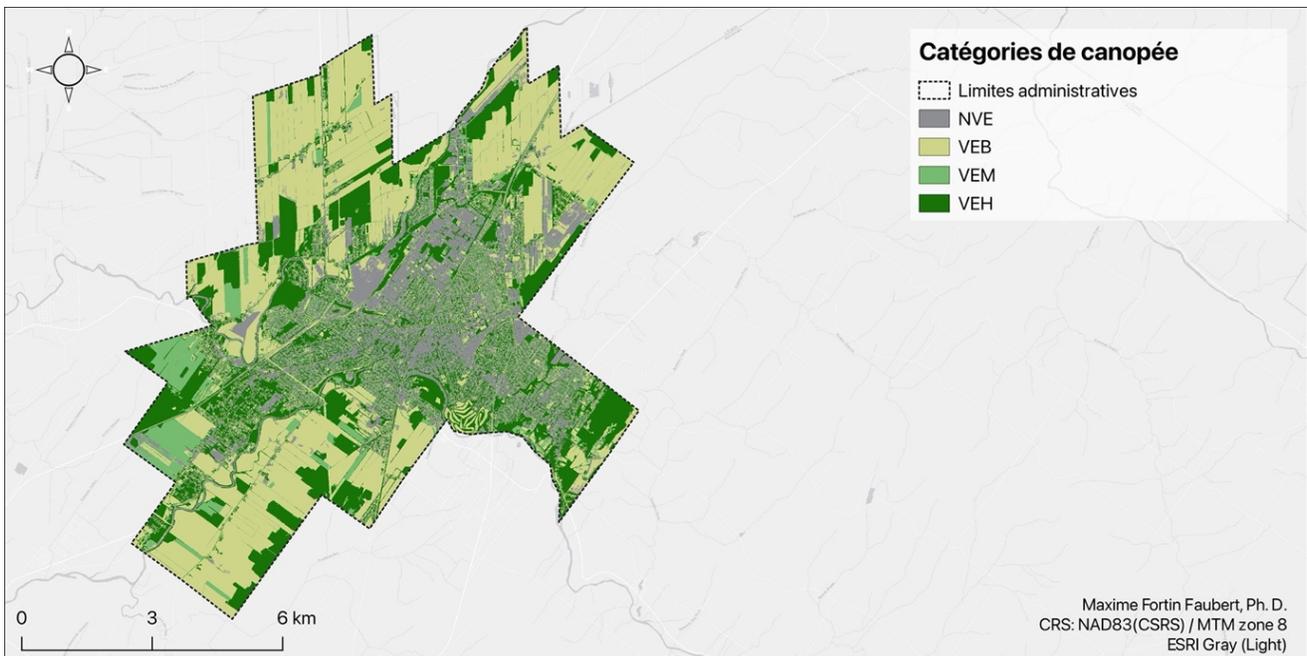


Figure 2. Cartographie des catégories de canopée pour la ville de Victoriaville.

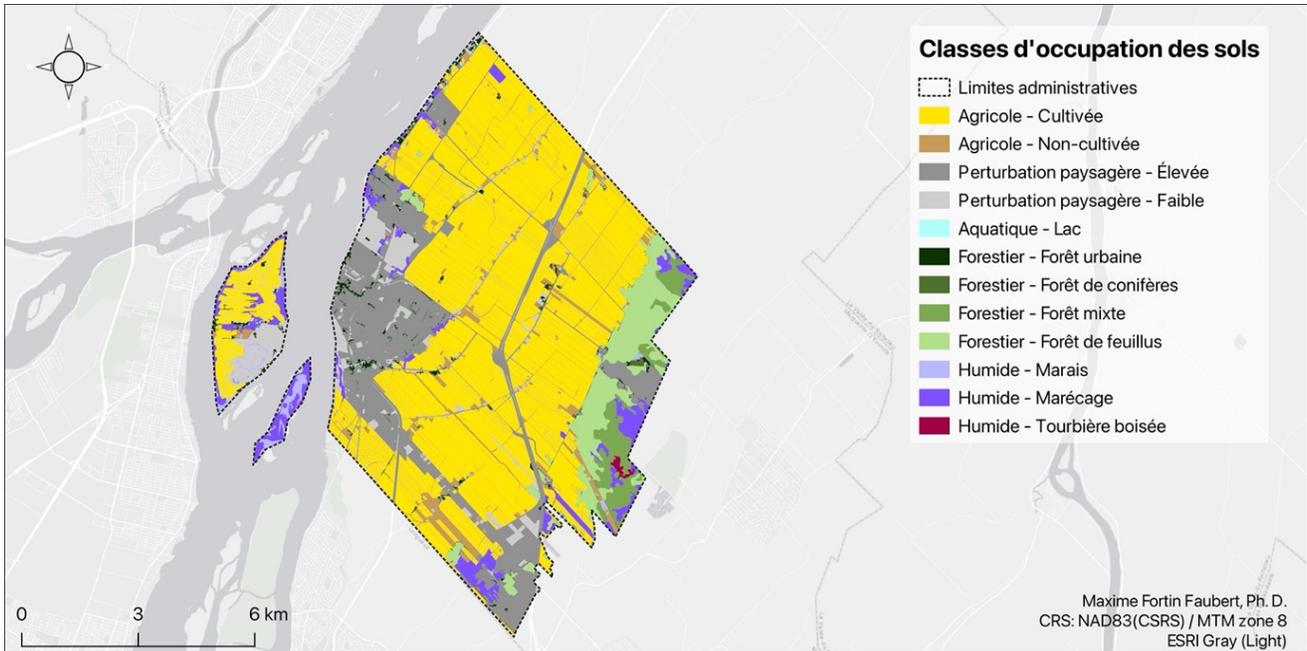


Figure 3. Cartographie des classes d'occupation des sols pour la municipalité de Varennes.

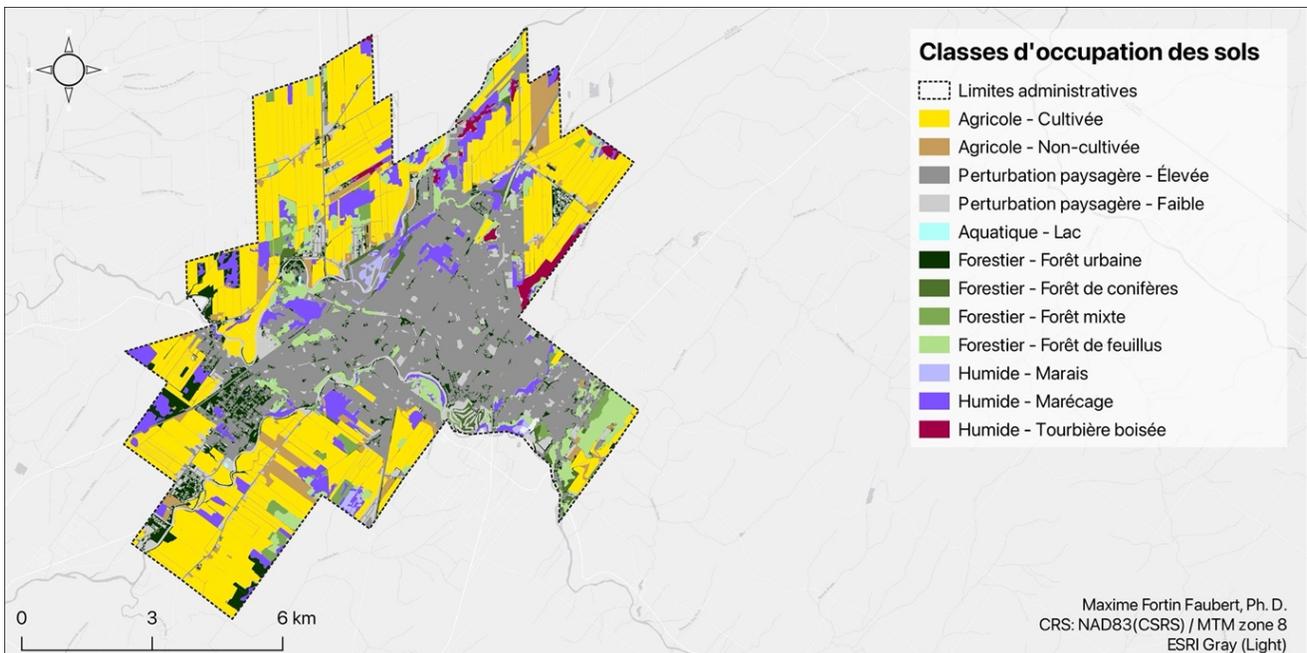


Figure 4. Cartographie des classes d'occupation des sols pour la municipalité de Victoriaville.

Modélisation des stocks de carbone dans les différents compartiments

Les Figures 5 à 12 présentent la localisation et la densité de carbone (tC/ha) estimée dans les différents compartiments (i.e., COS, CBA, CBS et CBM) à l'intérieur des limites administratives des villes de Varennes et de Victoriaville.

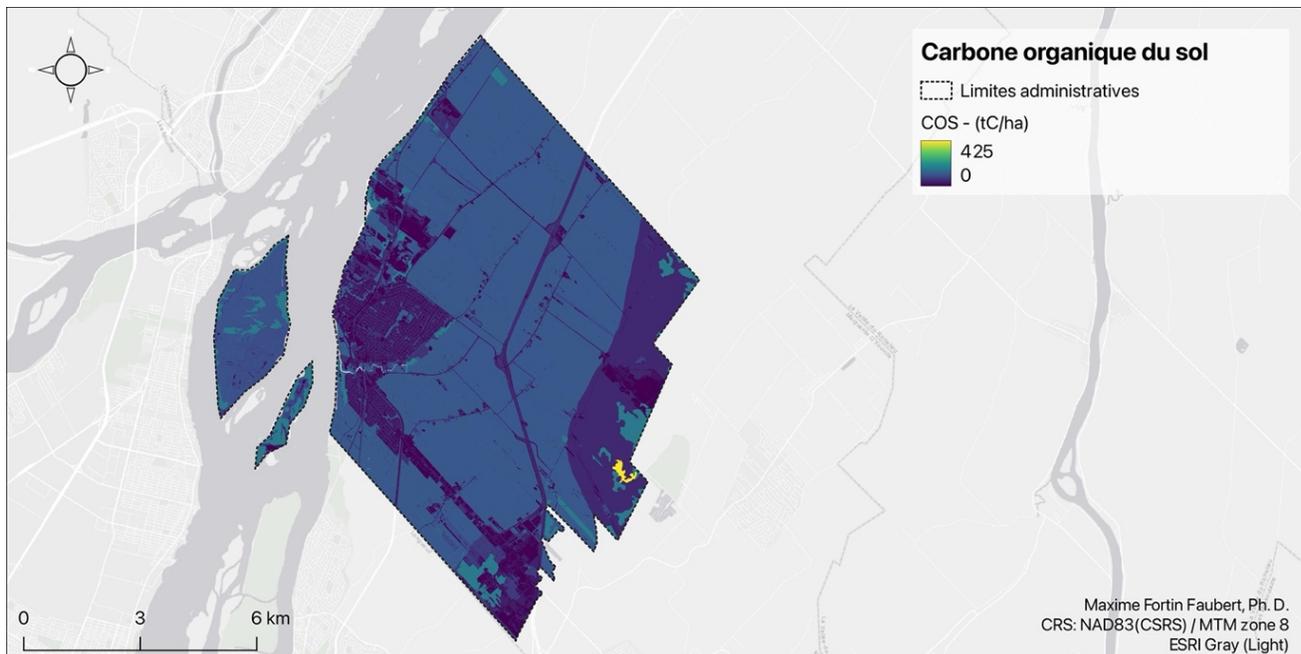


Figure 5. Cartographie du COS à l'échelle de la municipalité de Varennes.

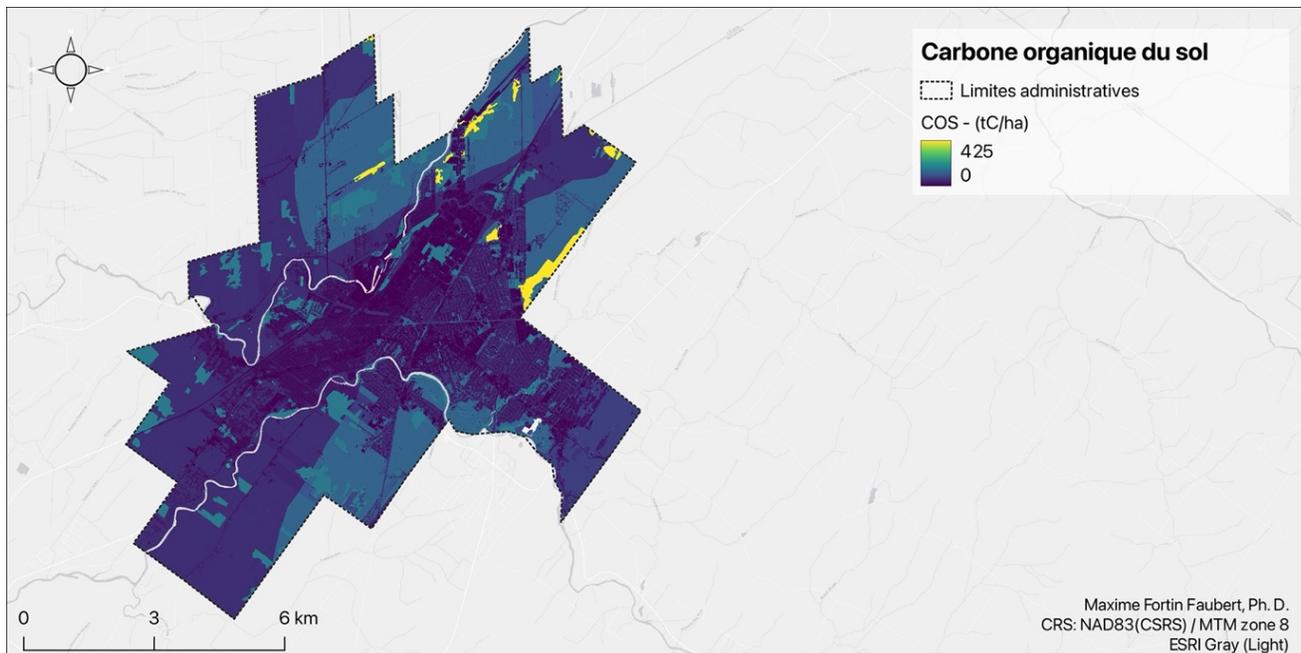


Figure 6. Cartographie du COS à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

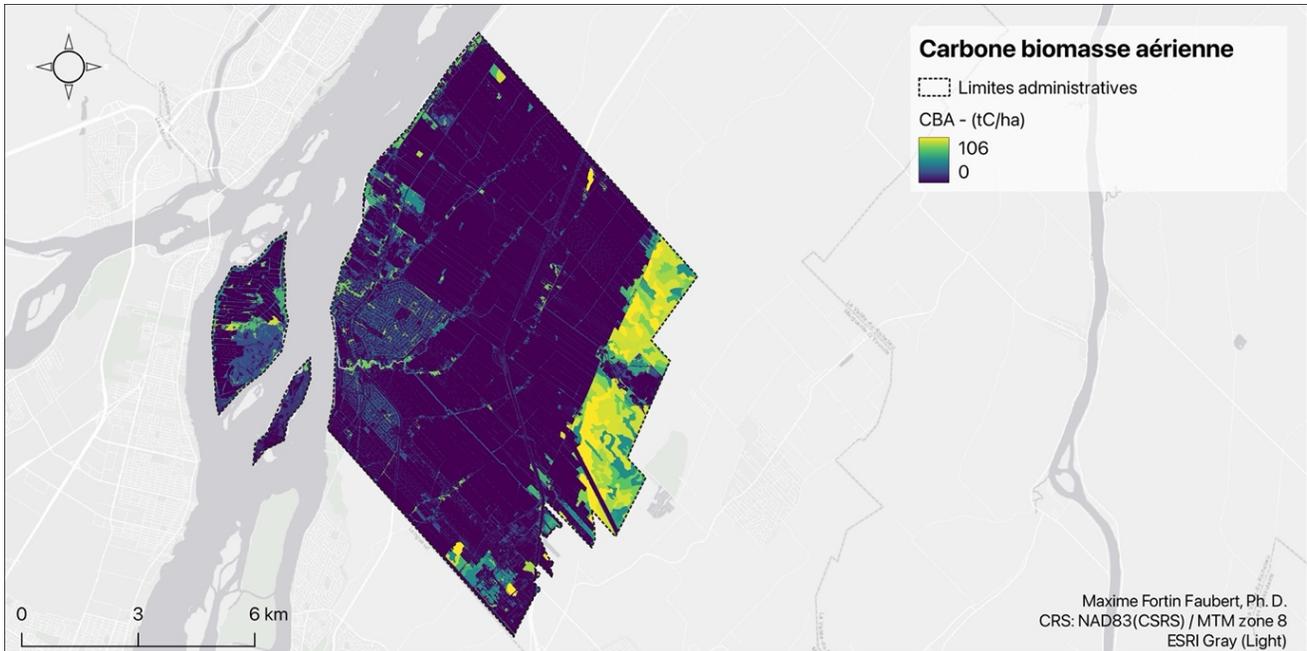


Figure 7. Cartographie du CBA à l'échelle de la municipalité de Varennes.

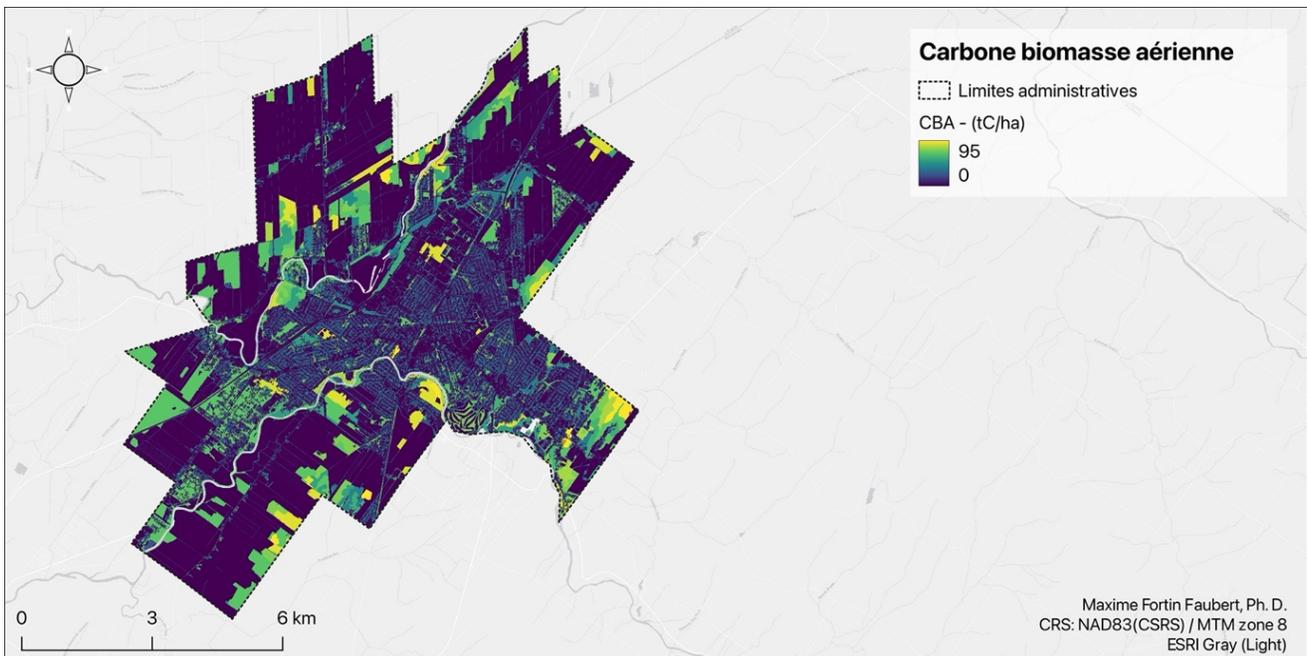


Figure 8. Cartographie du CBA à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

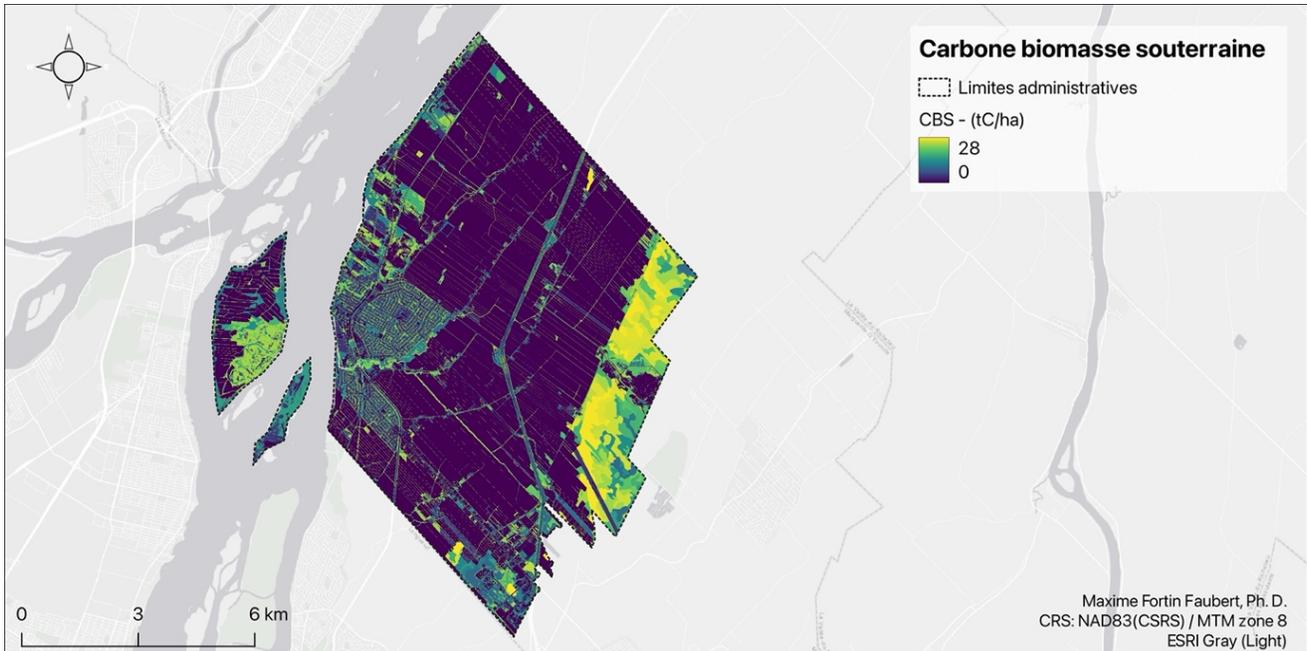


Figure 9. Cartographie du CBS à l'échelle de la municipalité de Varennes.

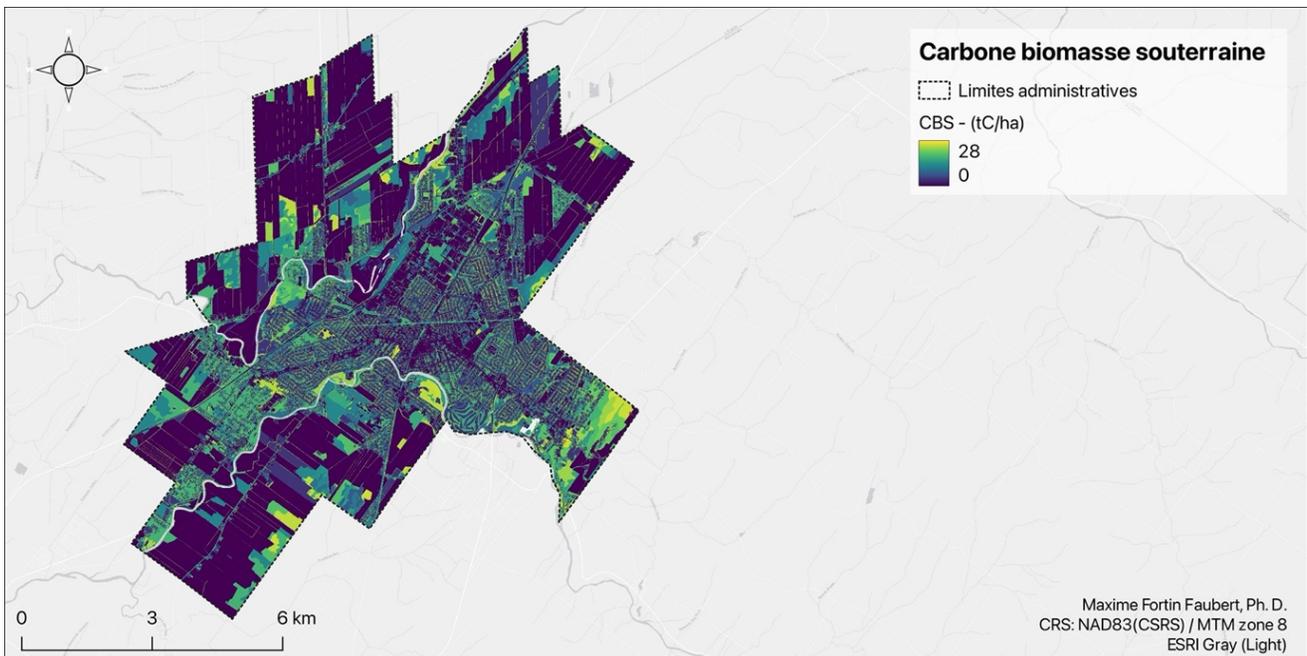


Figure 10. Cartographie du CBS à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

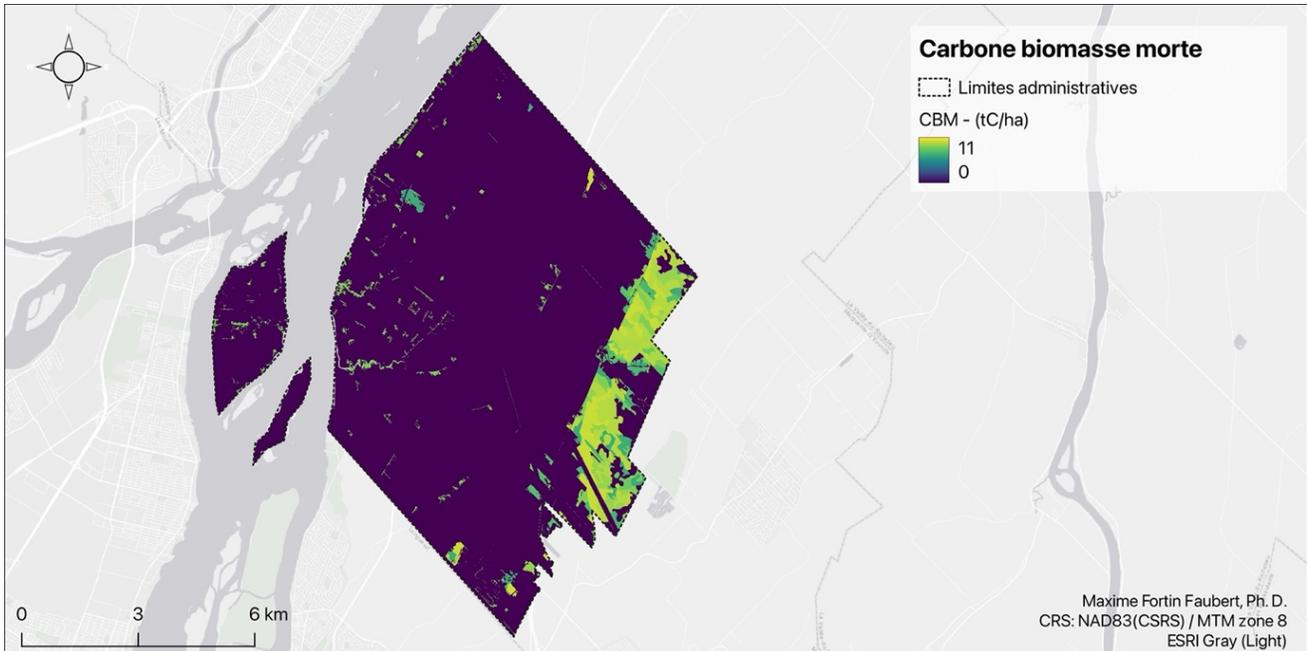


Figure 11. Cartographie du CBM à l'échelle de la municipalité de Varennes.

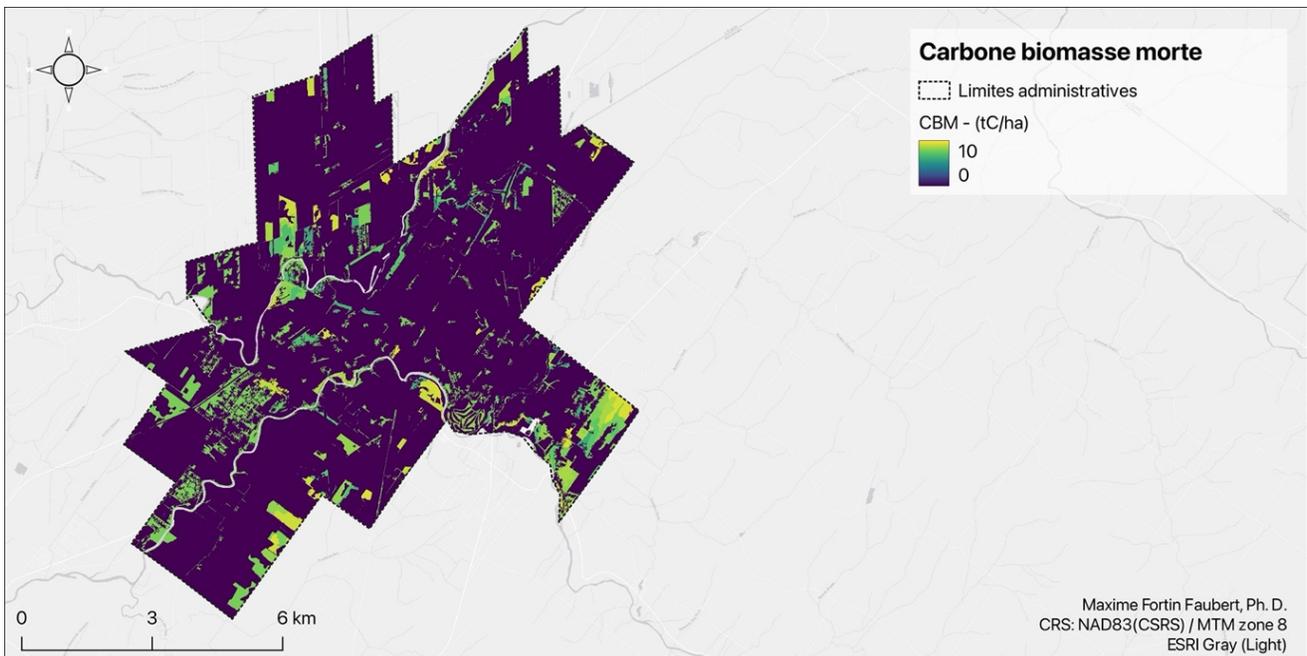


Figure 12. Cartographie du CBM à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

Modélisation des stocks de carbone totaux

La superposition finale des cartes de chaque compartiment a permis de dresser le portrait des stocks de carbone totaux (CTOT) dans chacune des deux villes partenaires (Figure 13 et 14).

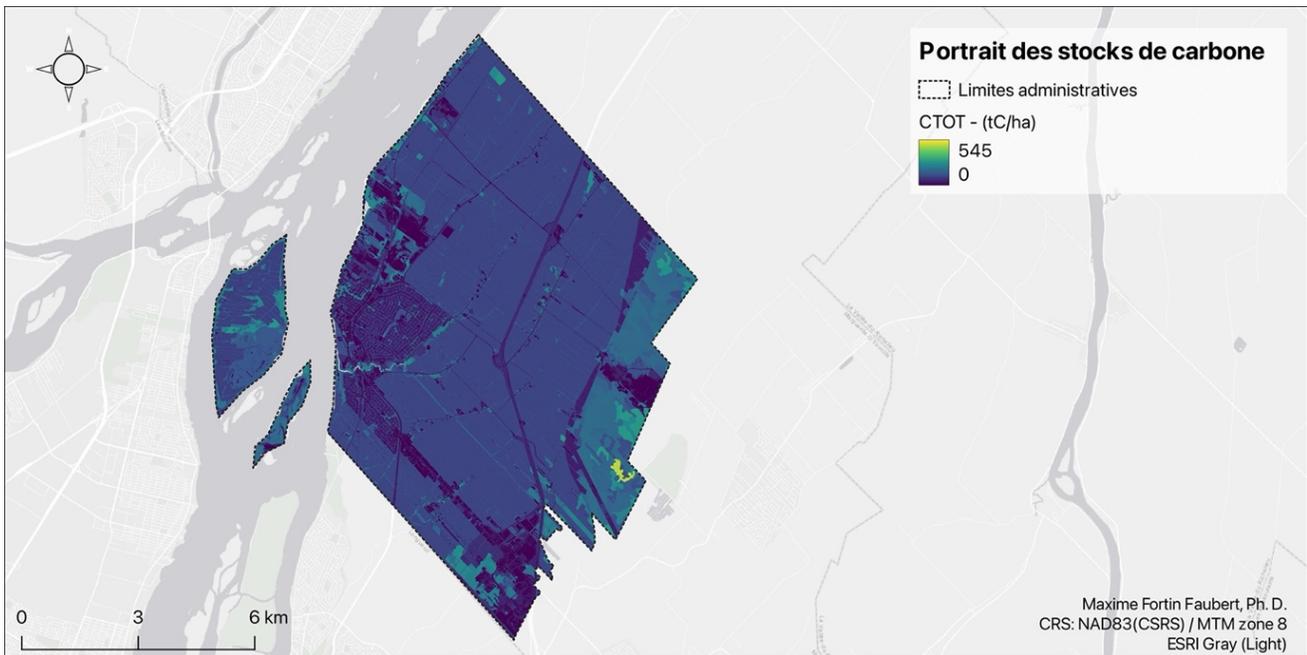


Figure 13. Cartographie des stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Varennes.

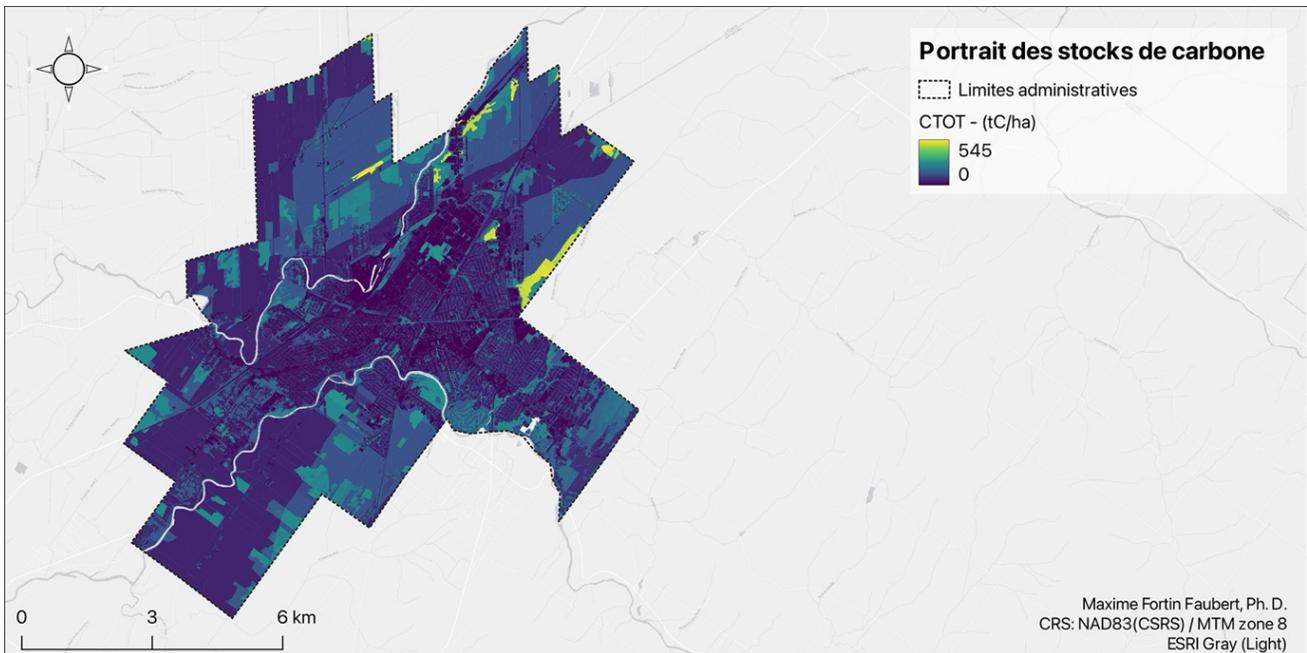


Figure 14. Cartographie des stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

Tableau 8. Stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Varennes.

Classes d'occupation des sols	Moyennes (tC/ha)	Superficies (ha)	Stocks totaux (tC)
Agricole - Cultivée	115,41	5 179,31	597 725,49
Agricole - Non cultivée	124,88	555,08	69 312,41
Perturbation paysagère - Élevée	52,42	1 589,82	83 339,45
Perturbation paysagère - Faible	118,13	482,57	56 990,08
Aquatique - Lac	229,12	0,55	126,94
Forestier - Autre couvert forestier	219,68	147,96	32 482,25
Forestier - Forêt de conifères	118,89	4,91	584,23
Forestier - Forêt mixte	172,73	253,01	43 697,35
Forestier - Forêt de feuillus	183,03	599,12	109 646,25
Humide - Marais	102,07	87,37	8 901,55
Humide - Marécages	239,26	436,88	104 478,18
Humide - Tourbières ouvertes minérotrophes	-	-	-
Humide - Tourbières ouvertes ombrotrophes	-	-	-
Humide - Tourbières ouvertes indifférenciées	-	-	-
Humide - Tourbières boisées	486,84	11,87	5 777,26
Humide - Autres	-	-	-

Tableau 9. Stocks de CTOT à l'échelle de la municipalité de Victoriaville.

Classes d'occupation des sols	Moyennes (tC/ha)	Superficies (ha)	Stocks totaux (tC)
Agricole - Cultivée	89,81	3 106,01	278 917,76
Agricole - Non cultivée	97,05	435,34	42 230,18
Perturbation paysagère - Élevée	47,76	2 485,33	118 683,60
Perturbation paysagère - Faible	101,56	418,40	42 476,83
Aquatique - Lac	228,86	4,62	1 056,18
Forestier - Autre couvert forestier	174,46	529,56	92 305,61
Forestier - Forêt de conifères	164,15	71,74	11 774,62
Forestier - Forêt mixte	193,30	141,95	27 435,12
Forestier - Forêt de feuillus	190,84	496,38	94 702,41
Humide - Marais	82,35	42,85	3 526,61
Humide - Marécages	226,59	640,47	145 090,51
Humide - Tourbières ouvertes minérotrophes	-	-	-
Humide - Tourbières ouvertes ombrotrophes	-	-	-
Humide - Tourbières ouvertes indifférenciées	-	-	-
Humide - Tourbières boisées	491,38	90,36	44 382,55
Humide - Autres	-	-	-

Les résultats du modèle suggèrent qu'un total de 1 113 061 et 902 582 tonnes de carbone sont stockés dans les municipalités de Varennes et de Victoriaville, respectivement (**Tableau 8 et 9**). Le modèle estime que les terres agricoles cultivées forment la classe d'utilisation des sols qui stocke la plus grande quantité de carbone dans les deux municipalités, représentant 53,7 % des stocks de carbone totaux à Varennes et 30,9 % des stocks de carbone totaux à Victoriaville. Ce constat n'est pas surprenant, puisque les terres agricoles cultivées occupent 55,4 % de la superficie totale de Varennes et 36,7 % de la superficie totale de Victoriaville. Les tourbières boisées formeraient la classe d'utilisation des sols qui contribue le plus au stockage de carbone avec des quantités moyennes de 486,84 tC/ha à Varennes et 491,38 tC/ha à Victoriaville.

Les applications pilotes menées sur les deux municipalités partenaires permettent de valider l'intérêt et l'utilité du modèle pour obtenir une vue d'ensemble détaillée des stocks de carbone dans les municipalités du Québec. Cependant, certaines limites méritent d'être prises en compte. En effet, les coefficients et les ratios R:P issus de la littérature reposent sur des moyennes calculées à partir de valeurs dont la variabilité peut être considérable selon les sites (Goyette et al., 2024). Il en résulte que les estimations fournies par le modèle pourraient diverger des valeurs observées localement sur le terrain.

De plus, en appliquant la valeur de 0 tC/ha à toutes les catégories de végétation en milieu agricole cultivé, le modèle néglige les stocks de carbone dans certains groupes de production, tels que les vergers, qui ne sont pas des cultures annuelles. L'approche pourrait ainsi être bonifiée en prenant en compte les différents groupes de production présents dans la *Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées*, afin d'obtenir des estimations plus complètes des stocks de carbone dans les paysages agricoles.

Le modèle tel que présenté peut facilement être répliqué sur le territoire d'autres municipalités du Québec. Toutefois, son intégration dans des outils libres d'accès, tels que R ou QGIS, faciliterait grandement son application auprès des municipalités qui souhaitent estimer les quantités de carbone stockées sur leur territoire et identifier les zones à fort potentiel de conservation.

CONCLUSION

Le développement d'un modèle d'estimation des stocks de carbone à l'échelle des municipalités du Québec constitue une avancée significative pour soutenir les initiatives de gestion durable et de développement écologique. En s'appuyant sur des données actualisées, gratuites, accessibles, et de qualités, ainsi qu'en intégrant des catégories de canopée aux différentes classes d'occupations des sols, et en considérant divers compartiments de carbone adaptés aux paysages municipaux, ce modèle offre une approche robuste et scientifiquement fondée pour quantifier les stocks de carbone locaux. De façon plus spécifique, le modèle développé et appliqué au territoire des municipalités de Varennes et de Victoriaville est cohérent avec les consensus scientifiques à l'effet que :

(1) la densité de carbone total dans les tourbières boisées (481-491 tC/ha) est nettement plus élevée que dans les autres classes d'occupation des sols - plus du double de la valeur des autres écosystèmes les plus riches en carbone, soit les lacs et des marécages selon les paramètres de notre modèle – renforçant la pertinence de tout effort de conservation de ces milieux pour augmenter les stocks de carbone, même sur de petites superficies.

(2) les stocks totaux de carbone des terres agricoles – cultivées et non cultivées ensemble – sont de 2 à 6 fois plus importants que les stocks totaux dans les marécages (la 2^e classe d'occupation des sols en ordre décroissant d'importance), principalement en raison de leurs vastes étendues. Les stocks de carbone moyens des terres agricoles non cultivées (97-125 t/ha) sont légèrement supérieurs à ceux des terres cultivées (89-115 t/ha), renforçant l'importance de la protection des milieux non cultivés pour les stocks de carbone des municipalités. Bien que le territoire agricole fasse l'objet d'une protection de la Commission de protection du territoire agricole du Québec, notamment pour des questions de sécurité alimentaire, ces observations encouragent les municipalités à réduire au maximum l'impact de la conversion des terres agricoles, cultivées ou non, si elles souhaitent renforcer leurs stocks de carbone.

Les applications pilotes menées sur les municipalités de Varennes et de Victoriaville ont par ailleurs permis de valider l'intérêt et l'utilité du modèle tout en mettant en évidence certaines limites d'interprétation à considérer pour garantir des estimations prudentes. En intégrant ce modèle dans des outils libres d'accès, tels que R ou QGIS, les municipalités pourront estimer de manière autonome les stocks de carbone sur leur territoire, identifier les zones présentant un potentiel de conservation élevé et évaluer l'efficacité des incitatifs mis en place. Cette autonomie représente un levier stratégique pour amplifier la prise de décisions éclairée en matière de politiques environnementales, d'écofiscalité et de gestion du territoire. La collaboration avec des institutions de recherche et d'enseignement pourrait permettre aux municipalités d'avoir accès à certaines bases de données plus précises et dont l'accès est restreint à ces usages.

Cette recherche a été menée dans le cadre d'un projet d'implantation de mesures d'écofiscalité jumelées aux solutions nature pour le climat dans les municipalités du sud du Québec. Le but était de créer un modèle de calcul de stockage de carbone, et des gains possibles découlant de l'implantation des mesures d'écofiscalité.

Ce rapport fournit une méthodologie utilisant des données ouvertes et gratuites et des formules de calcul relativement simples aux municipalités qui ne disposent pas de grandes équipes de géomatique à l'interne ni des ressources financières suffisantes pour acheter cette expertise à l'externe.

RÉFÉRENCES

- Allard, M., Jobin, B., Joly, M., Côté, M.-J., Benoit, M., Landry, F., Ith-Tek, M. M. et Dupont-Hébert, M. (2018). *Cartographie de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent*.
- Axe, M. S., Grange, I. D. et Conway, J. S. (2017). Carbon storage in hedge biomass—A case study of actively managed hedges in England. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 250, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.008>
- Boudreau, J., Nelson, R., Margolis, H., Beaudoin, A., Guindon, L. et Kimes, D. (2008). Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3876-3890. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.003>
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H. et Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>
- CMM. (2012). *PMAD | Plan métropolitain d'aménagement et de développement*. Communauté métropolitaine de Montréal.
- CMM. (2017). *Indice canopée métropolitain - Méthodologie*. Communauté métropolitaine de Montréal.
https://observatoire.cmm.qc.ca/documents/geomatique/IndiceCanopee/2015/CMM_indiceCanopee_2015_methodologie.pdf
- Convention on Biological Diversity, (CBD). (2022). Cadre mondial de la biodiversité de Kunming-Montréal. *Programme des Nations Unies pour l'environnement*.
<https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-en.pdf>
- Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, (UNFCCC). (2015). Accord de Paris. *Nations Unies*.
https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf
- Crockett, E. T. H., Atkins, J. W., Guo, Q., Sun, G., Potter, K. M., Ollinger, S., Silva, C. A., Tang, H., Woodall, C. W., Holgerson, J. et Xiao, J. (2023). Structural and species diversity explain aboveground carbon storage in forests across the United States: Evidence from GEDI and forest inventory data. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113703. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113703>
- Dawud, S. M., Raulund-Rasmussen, K., Domisch, T., Finér, L., Jaroszewicz, B. et Vesterdal, L. (2016). Is Tree Species Diversity or Species Identity the More Important Driver of Soil Carbon Stocks, C/N Ratio, and pH? *Ecosystems*, 19(4), 645-660. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9958-1>
- Données Québec. (2024). *Mosaïque d'orthophotographies aériennes de l'inventaire écoforestier du Québec méridional*.
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/mosaique>
- Drexler, S., Gensior, A. et Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>

- Dürr, G. H., Kunelius, H. T., Drapeau, R., McRae, K. B. et Fillmore, S. A. E. (2005). Herbage yield and composition of Kentucky bluegrass (*Poa pratensis* L.) cultivars under two harvest systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(3), 631-639. <https://doi.org/10.4141/P04-121>
- Dziamski, A., Stypczyńska, Z., Żurek, G., Łabędzki, L. et Długosz, J. (2007). Observations of root system development and dynamics of root: shoot ratio of selected turf grass varieties and breeding lines grown in different soil conditions. *Plant Breeding and Seed Science*, 55.
- ESA. (2012). *Sentinel-2*. European Space Agency. https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf
- Ferland, M., Del Giorgio, P. A., Teodoru, C. R. et Prairie, Y. T. (2012). Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Québec. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(4), 2011GB004241. <https://doi.org/10.1029/2011GB004241>
- Fortin Faubert, M., Hénault-Ethier, L. et Duchesne, S. (2023). *S'adapter au climat par le verdissement - Guide pour les municipalités*. Union des municipalités du Québec (UMQ). <https://umq.qc.ca/wp-content/uploads/2023/05/webumqguidereverdissement2023-7.pdf>
- Fortin Faubert, M. et Huet, A. (2024). Identifier le potentiel de diversification du territoire par la transformation des pelouses. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34008.40962>
- Gouvernement du Québec. (2024). *Plan Nature 2030*.
- Goyette, J.-O., Loiselle, A., Mendes, P., Cimon-Morin, J., Pellerin, S., Poulin, M. et Dupras, J. (2024). Above and belowground carbon stocks among organic soil wetland types, accounting for peat bathymetry. *Science of The Total Environment*, 946, 174177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174177>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645-11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Guo, Y. et Chen, W. Y. (2024). Monitoring tree canopy dynamics across heterogeneous urban habitats: A longitudinal study using multi-source remote sensing data. *Journal of Environmental Management*, 356, 120542. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120542>
- Guyon, A.-C. (2022). En mode solutions nature: les écosystèmes partenaires de la lutte aux changements climatiques. *Nature Québec*. <https://robvq.qc.ca/tempo/articles/626/en-mode-solutions-nature-les-ecosystemes-partenaires-de-la-lutte-aux-changements-climatiques>
- IFN. (2009). Canada's National Forest Inventory. <https://nfi.nfis.org/resources/groundplot/4a-GPDataDictionary5.0.pdf>
- IFN. (2016). *Calculateur de la biomasse*. <https://nfi.nfis.org/fr/biomass>

- IPBES. (2022). The global assessment report of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. *IPBES Secretariat, Bonn, Germany*, 1148.
- IPCC. (2006a). Chapter 6, Grassland. Dans *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (vol. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use).
- IPCC. (2006b). *Chapitre 2 : Méthodologies génériques applicables à diverses affectations des terres.* https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf
- IPCC. (2006c). Chapter 5, Cropland. Dans *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (vol. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use).
- IPCC. (2006d). Chapter 4, Forest land. Dans *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (vol. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use).
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (Cambridge University Press).
- Jolin-Dahel, L. (2024). Nicolet: protéger la nature par des mesures écofiscales. *LeDevoir*. <https://www.ledevoir.com/environnement/822322/nicolet-protoger-nature-mesures-ecofiscales?>
- Kull, S. J., Rampley, G. J., Morken, S., Metsaranta, J., Neilson, E. T. et Kurz, W. A. (2016). *Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (Mbc-sfc3)*.
- Lal, R., Lorenz, K., Hüttl, R. F., Schneider, B. U. et Von Braun, J. (dir.). (2012). *Recarbonization of the Biosphere: Ecosystems and the Global Carbon Cycle*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4159-1>
- Laterreur, I., Royer, R., Ouellette, J., Beaudet, J. et Gosselin, D. (2022). *S'adapter au climat par la réglementation - Guide pour les municipalités*. Union des municipalités du Québec (UMQ). <https://umq.qc.ca/wp-content/uploads/2022/03/guide-climat-reglementation-29mars22.pdf>
- Li, Z., Kurz, W. A., Apps, M. J. et Beukema, S. J. (2003). Belowground biomass dynamics in the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector: recent improvements and implications for the estimation of NPP and NEP. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(1), 126-136. <https://doi.org/10.1139/x02-165>
- Magnan, G., Garneau, M., Beaulne, J., Lavoie, M., Pellerin, S., Perrier, L., Richard, P. J. H. et Sanderson, N. (2023). A simple field method for estimating the mass of organic carbon stored in undisturbed wetland soils.
- MAMH. (2021). Dictionnaire données Usages prédominants 2021. *Direction de la transformation numérique et de la géomatique*. https://s3.valeria.science/geoindex-prod/cartto/GUIDES/Usage_predominant/2021/Dictionnaire_donnees_Usage_predominant_2021.pdf
- MAMH. (2022). Manuel d'évaluation foncière du Québec.

- MELCCFP. (2022). *Stratégie de mobilisation pour l'action climatique 2022-2027*. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.
- MRNF. (2024a). *Index cartographiques à l'échelle de 1/2 000, de 1/20 000 et de 1/100 000*. Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/index-cartographiques-a-l-echelle-de-1-2-000-1-20-000-et-1-100-000>
- MRNF. (2024b). Inventaire écoforestier du Québec méridional. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/forets/recherche-connaissances/inventaire-forestier/types/quebec-meridional>
- MRNF. (2024c). *Biomasse et carbone forestiers du Québec méridional - Description d'un jeu de données*.
- Mukul, S. A., Halim, Md. A. et Herbohn, J. (2020). Forest Carbon Stock and Fluxes: Distribution, Biogeochemical Cycles, and Measurement Techniques. Dans W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia et T. Wall (dir.), *Life on Land* (p. 1-16). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_23-1
- NASA. (2020). *Landsat 9*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2020-11/Landsat%209%20brochure%20final%20508%20compliant.pdf>
- Nowak. (2021). *Understanding i-Tree: 2021 Summary of programs and methods* (n° NRS-GTR-200-2021). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-200-2021>
- Nowak, D., Crane, D., Stevens, J., Hoehn, R., Walton, J. et Bond, J. (2008). A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(6), 347-358. <https://doi.org/10.48044/jauf.2008.048>
- QGIS Development Team. (2023). Quantum GIS Geographic Information System. <https://www.qgis.org>
- R Core Development Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.
- Robinson, D. T., Zhang, J., MacDonald, D. et Samson, C. (2023). Estimating Settlement carbon stock and density using an inventory approach and quantifying their variation by land use and parcel size. *Urban Forestry & Urban Greening*, 82, 127878. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127878>
- Shaw, C. H., Bona, K. A., Kurz, W. A. et Fyles, J. W. (2015). The importance of tree species and soil taxonomy to modeling forest soil carbon stocks in Canada. *Geoderma Regional*, 4, 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.01.001>
- Sothe, C., Gonsamo, A., Arabian, J., Kurz, W. A., Finkelstein, S. A. et Snider, J. (2022). Large Soil Carbon Storage in Terrestrial Ecosystems of Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 36(2), e2021GB007213. <https://doi.org/10.1029/2021GB007213>

- Srour, N., Thiffault, E. et Boucher, J.-F. (2024). Quantifying carbon stocks and functional diversity of roadside ecosystems – A case study in Quebec, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128163. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128163>
- Steenberg, J. W. N., Ristow, M., Duinker, P. N., Lapointe-Elmrabti, L., MacDonald, J. D., Nowak, D. J., Pasher, J., Flemming, C. et Samson, C. (2023). A national assessment of urban forest carbon storage and sequestration in Canada. *Carbon Balance and Management*, 18(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00230-4>
- Tarnocai, C. et Lacelle, B. (1996). *Base de données sur le carbone organique dans les sols du Canada*. <https://sis.agr.gc.ca/siscan/>
- Victoriaville. (2019). *Plan d'urbanisme de Victoriaville*. Ville de Victoriaville. <https://www.munidata.ca/upload/contentsFile/file/Ing/2674fr-CA.pdf?v=20200310051412>
- Ville de Varennes. (2023). Varennes, Victoriaville et la SNAP Québec se lancent dans un projet innovant en écofiscalité. <https://www.ville.varennes.qc.ca/actualites/23/05/15/varennes-victoriaville-et-la-snap-quebec-se-lancent-dans-un-projet-innovant-en-ecofiscalite>
- Wang, X., Wang, M., Wang, S. et Wu, Y. (2015). Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(5), 152-159. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2015.05.022>
- Xu, W., Yang, W., Chen, S., Wu, C., Chen, P. et Lan, Y. (2020). Establishing a model to predict the single boll weight of cotton in northern Xinjiang by using high resolution UAV remote sensing data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179, 105762. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105762>

ANNEXE

Tableau S1. Liste des CUBF qui composent chaque classe d'usage prédominant.

Usage prédominant	CUBF
Agricole	(>= 8000 ET < 8300)
Commercial	(>= 5000 ET < 5800) OU (>= 5900 ET < 6000)
Exploitation minière et service connexe	(>= 8500 ET < 9000)
Forestier	(>= 8300 ET < 8400)
Industrie lourde	(>= 2700 ET < 2800) OU (>= 2900 ET < 3500) OU (>= 3600 ET < 3900)
Industrie légère	(>= 2000 ET < 2700) OU (>= 2800 ET < 2900) OU (>= 3000 ET < 3100) OU (>= 3500 ET < 3600) OU (>= 3900 ET < 4000)
Institutionnel	(>= 6510 ET < 6520) OU (>= 6700 ET < 7200)
Parc et récréation	(>= 7200 ET < 8000)
Pêche, chasse, piégeage et activité connexe	(>= 8400 ET < 8500)
Restauration et hébergement	(>= 5800 ET < 5900)
Résidentiel	(>= 1000 ET < 1540) OU (>= 1600 ET < 2000)
Résidentiel institutionnel	(>= 1540 ET < 1600)
Service	(>= 6000 ET < 65100) OU (>= 6520 ET < 6700)
Terrain vague	(= 9100)
Transport et infrastructure	(>= 4000 ET < 5000)
Sans correspondance	(= Sans correspondance)

Adapté du dictionnaire des données d'usages prédominants (MAMH, 2021). Les codes d'utilisation des biens-fonds (CUBF) sont ceux qui figurent à l'annexe 2C.1 du Manuel d'évaluation foncière du Québec (MAMH, 2022).

Tableau S2. Résumé des valeurs utilisées pour chaque compartiment.

Code classes d'occupation des sols	Code canopée	Code numérique	COS	CBA	CBS	CBM
Agricole – Cultivée 1000	1 - NVE	1001	REF[]	0	0	
	2 - VEB	1002	REF[]	0	0	
	3 - VEM	1003	REF[]	0	0	
	4 - VEH	1004	REF[]	0	0	
Agricole – Non-cultivée 1100	1 - NVE	1101	0	0	0	
	2 - VEB	1102	REF[] *0,82	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1103	REF[] + 17	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1104	REF[] *1.00	45,87	CBA[] *0.26	
Anthropique - Perturbation paysagère élevée 1200	1 - NVE	1201	0	0	0	
	2 - VEB	1202	REF[] *1,14 *(1 - 1,0) + (0,5 *REF[]) *1,14 *1,0	2,10	CBA[] *5.7	
	3 - VEM	1203	REF[] *1,00 *(1 - 1,0) + (0,5 *REF[]) *1,00 *1,0	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1204	REF[] *1,00 *(1 - 1,0) + (0,5 *REF[]) *1,00 *1,0	45,87	CBA[] *0.26	
Anthropique - Perturbation paysagère faible 1300	1 - NVE	1301	0	0	0	
	2 - VEB	1302	REF[] *1,14 *(1 - 0,1) + (0,5 *REF[]) *1,14 *0,1	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1303	REF[] *1,00 *(1 - 0,1) + (0,5 *REF[]) *1,00 *0,1	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1304	REF[] *1,00 *(1 - 0,1) + (0,5 *REF[]) *1,00 *0,1	45,87	CBA[] *0.26	
Aquatique – Lac 1400	1 - NVE	1401	230	0	0	
	2 - VEB	1402	230	0	0	
	3 - VEM	1403	230	0	0	
	4 - VEH	1404	230	0	0	
Forestier - Autre couvert forestier 1500	1 - NVE	1501	0	0	0	
	2 - VEB	1502	REF[]	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1503	REF[]	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1504	REF[]	MP.IFN[]	CBA[] *0.26	CBA[] *0.0603 +3.7437
Forestier - Forêt de conifères 1600	1 - NVE	1601	0	0	0	
	2 - VEB	1602	REF[]	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1603	REF[]	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1604	REF[]	IFN[]	CBA[] *0.222	CBA[] *0.0603 +3.7437
Forestier - Forêt mixte 1700	1 - NVE	1701	0	0	0	
	2 - VEB	1702	REF[]	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1703	REF[]	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1704	REF[]	IFN[]	CBA[] *0.26	CBA[] *0.0603 +3.7437
Forestier - Forêt de feuillus 1800	1 - NVE	1801	0	0	0	
	2 - VEB	1802	REF[]	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1803	REF[]	25,5	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1804	REF[]	IFN[]	(CBA[] ^{0,615}) *1,576	CBA[] *0.0603 +3.7437
Humide – Marais 1900	1 - NVE	1901	0	0	0	
	2 - VEB	1902	89,23	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	1903	89,23	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	1904	89,23	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	

Tableau S2. Résumé des valeurs utilisées pour chaque compartiment (Suite).

Code classes d'occupation des sols	Code canopée	Code numérique	COS	CBA	CBS	CBM
Humide – Marécage 2000	1 - NVE	2001	0	0	0	
	2 - VEB	2002	175	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2003	175	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2004	175	IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	
Humide - Tourbière ouverte minérotrophe 2100	1 - NVE	2101	0	0	0	
	2 - VEB	2102	1010	0	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2103	1010	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2104	1010	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	
Humide - Tourbière ouverte ombrotrophe 2200	1 - NVE	2201	0	0	0	
	2 - VEB	2202	1320	0	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2203	1320	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2204	1320	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	
Humide - Tourbière ouverte indifférenciée 2300	1 - NVE	2301	0	0	0	
	2 - VEB	2302	1165	0	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2303	1165	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2304	1165	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	
Humide - Tourbière boisée 2400	1 - NVE	2401	0	0	0	
	2 - VEB	2402	425	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2403	425	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2404	425	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	
Humide – Autre 2500	1 - NVE	2501	0	0	0	
	2 - VEB	2502	REF[]	1,13	CBA[] *4.0	
	3 - VEM	2503	REF[]	16,75	CBA[] *0.94	
	4 - VEH	2504	REF[]	IFN[] ou MP.IFN[] ou 45,87	CBA[] *0.1875	