

FORESTIER EN CHEF

BILAN PROVINCIAL DU CARBONE FORESTIER

PÉRIODE 2023-2028



Bilan provincial du carbone forestier - Période 2023-2028

Coordination

Jean Girard, ing.f., M.Sc.

Jean-François Carle, ing.f., M.Sc.

Rédaction

Ariane Brousseau-Dumont, ing.f.

Helin Dura, ing.f., M.Sc.

Collaboration

Jean-François Carle, ing.f., M.Sc.

Guillaume Cyr, ing.f., M.Sc.

Bruno Forest, ing.f.

Révision

Jean Girard, ing.f., M.Sc.

Jean-François Carle, ing.f., M.Sc.

Lucie Bertrand, ing.f., Ph.D.

Annie Boucher-Roy, ing.f.

Référence

Forestier en chef, 2022. Bilan provincial du carbone forestier - Période 2023-2028, Roberval, Québec, 40 pages.

Cette publication est disponible à l'adresse suivante : www.forestierenchef.gouv.qc.ca

Le 16 décembre 2022

Version 4.0.2 février 2023

Forestier en chef

845, Boulevard Saint-Joseph

Roberval (Québec) G8H 2L6

Téléphone : 418 275 7770

Courriel : bureau@fec.gouv.qc.ca

Internet : www.forestierenchef.gouv.qc.ca

Table des matières

Glossaire des termes relatifs au carbone forestier	2
Introduction	3
Cycle du carbone en forêt naturelle et aménagée	4
Comptabilisation du carbone	6
Méthodologie	7
Modèle générique du bilan carbone (MGBC).....	7
FMT.....	8
Analyses statistiques.....	8
Résultats.....	10
Superficie	10
Bilan général du carbone forestier	12
Stocks.....	12
Échanges nets de l'écosystème.....	15
Productivité.....	19
Discussion	28
Conclusion	32
Références	33
Annexe 1. Liste des unités d'aménagement.....	34
Annexe 2. Données par unité d'aménagement	36

Glossaire des termes relatifs au carbone forestier

Les **termes en gras** sont utilisés dans les documents produits par le Forestier en chef.

Termes	Unités de mesure	Équivalence	Définitions
Stock	tC ou tC/ha	NA	Quantité totale ou par hectare de carbone solide emmagasinée dans les réservoirs forestiers. Il s'agit d'une accumulation à partir de la dernière perturbation ayant eu lieu dans l'écosystème.
Réservoir	NA	NA	Bassin dans lequel s'accumule le carbone solide. Dans l'écosystème forestier, les réservoirs sont : biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort, litière, sol.
Échanges	tCO _{2e} /ha/an	Flux	Déplacement du carbone entre l'atmosphère et les différents réservoirs et l'écosystème forestier.
Productivité	tC/ha/an	Productivité primaire nette	Taux annuel moyen d'accumulation de carbone sous forme solide dans les réservoirs forestiers. Il s'agit de la différence entre la photosynthèse et la respiration des végétaux.
Séquestration	tCO _{2e} /ha/an	Captation	Quantité de carbone atmosphérique emmagasiné et transformé sous forme de carbone solide, dans les divers réservoirs de la forêt.
Potentiel d'atténuation			Performance de l'écosystème à réduire les émissions de carbone atmosphérique en fonction d'un niveau de référence (scénario de référence).
Puits de carbone	NA	Puits	Lorsque les échanges nets de l'écosystème sont négatifs, l'écosystème est considéré comme un puits de carbone.
Source de carbone	NA	Source	Lorsque les échanges nets de l'écosystème sont positifs, l'écosystème est considéré comme une source de carbone.
Échanges nets de l'écosystème (ENE)	tCO _{2e} /ha/an		Différence annuelle moyenne entre la quantité de CO _{2e} émise par l'écosystème et celle qui y est séquestrée. Lorsque les échanges nets sont positifs, l'écosystème forestier est considéré comme une source et lorsqu'ils sont négatifs, ils sont considérés comme un puits.

Introduction

Compte tenu de l'urgence des enjeux climatiques, le gouvernement du Québec s'est engagé à réduire de façon significative ses émissions de gaz à effet de serre. La stratégie de réduction des gaz à effet de serre est inscrite dans le *Plan pour une économie verte 2030*. D'ici 2030, ce plan vise une réduction de 37,5 % par rapport au niveau de référence de 1990, alors que la carboneutralité est prévue pour 2050. Un des principaux objectifs du *Plan pour une économie verte 2030* cherche à utiliser la forêt comme moyen de séquestration du carbone. Par le passé, le Québec a déjà consenti des efforts particuliers afin de mieux intégrer la lutte contre les changements climatiques dans l'aménagement des forêts du domaine de l'État, notamment à travers la *Stratégie d'aménagement durable des forêts*.

Le principal mandat du Forestier en chef consiste à déterminer les possibilités forestières des forêts publiques. Les possibilités forestières correspondent au volume maximal des récoltes annuelles de bois par essence ou groupe d'essences établi de façon à tenir compte des objectifs d'aménagement durable des forêts. Le calcul des possibilités forestières est effectué pour chaque unité d'aménagement, territoire forestier résiduel et forêt de proximité. Des travaux sont en cours afin d'intégrer la comptabilisation du carbone forestier comme variable décisionnelle dans la détermination des possibilités forestières, au même titre que les autres variables déjà considérées.

À cet effet, depuis 2018, le Forestier en chef a développé une plateforme de comptabilisation du carbone forestier. Plus récemment, les développements ont permis d'identifier des indicateurs de suivi des stocks et des flux de carbone à partir du calcul des possibilités forestières. Ces outils ont été utilisés pour générer les résultats pour 29 unités d'aménagement, celles ayant reçu de nouvelles données d'inventaire qui ont permis d'effectuer un nouveau calcul pour la période 2023-2028 (annexe 1). Des informations détaillées par unité d'aménagement permettent de mieux comprendre la relation entre leurs caractéristiques forestières respectives comme outil de séquestration du carbone.

Afin d'intégrer la comptabilisation du carbone forestier dans ses travaux, le Forestier en chef a effectué une analyse à partir des résultats du calcul. Les résultats sont discutés dans ce rapport. Les objectifs poursuivis sont :

- ▶ Réaliser un bilan provincial des stocks et des flux de carbone pour les 29 unités d'aménagement ayant un nouveau calcul.
- ▶ Comprendre l'évolution du carbone forestier sur la majorité de l'horizon du calcul des possibilités forestières, soit de 2023 à 2163.
- ▶ Effectuer une analyse statistique exploratoire permettant de comparer les données sur le carbone avec les informations forestières issues du calcul des possibilités forestières.
- ▶ Fournir les principaux constats et des pistes d'améliorations futures permettant un meilleur estimé du potentiel d'atténuation du réchauffement planétaire par le carbone des écosystèmes forestiers du Québec.



Cycle du carbone en forêt naturelle et aménagée

Au cours des 30 dernières années, les superficies forestières ont séquestré plus d'un tiers des émissions mondiales de carbone originaires de la combustion des énergies fossiles¹. Pour cette raison, les forêts sont aujourd'hui désignées comme un atout essentiel à la mitigation du réchauffement planétaire. Les études scientifiques considèrent les forêts comme un puits de carbone puisque la différence entre la quantité de carbone émise et la quantité séquestrée est négative. Des recherches sont toutefois en cours afin de déterminer le caractère permanent des forêts comme outil de séquestration du carbone à plus long terme.

Le cycle du carbone est représenté par un équilibre entre les quantités de carbone séquestrées par l'écosystème (séquestration) et celles qui sont relâchées dans l'atmosphère (émissions). En général, le carbone est étudié sous la forme d'un bilan tenant compte des perturbations affectant la forêt : feux, épidémies d'insectes et récolte intervenues entre deux lectures. En établissant un bilan évolutif dans le temps basé sur le calcul des possibilités forestières, les analyses qui font l'objet de ce rapport tiennent compte de la perturbation par la récolte et les perturbations naturelles récentes tout comme dans le cas des possibilités forestières. Trois concepts sont à retenir :

1. Les stocks (tC/ha) : les quantités totales de carbone solide emmagasinées dans les réservoirs forestiers (arbres, racines, sols). Il s'agit d'une accumulation à partir de la dernière perturbation ayant eu lieu dans l'écosystème.
2. La productivité (tC/ha/an) : taux annuel moyen d'accumulation de carbone sous forme solide dans les réservoirs forestiers
3. Les échanges nets (tCO₂e/ha/an) : le bilan des échanges de CO₂e entre la forêt et l'atmosphère. Il s'agit de la différence entre la quantité de CO₂e émise par l'écosystème et celle qui y est séquestrée chaque année.

Les gaz à effet de serre (GES) ont des conséquences sur l'intégrité des écosystèmes terrestres. L'effet de serre est un phénomène naturel qui assure à l'atmosphère une capacité de rétention de la chaleur émise par le soleil et des conditions de vie nécessaires aux organismes vivants. Or, l'accumulation actuelle de GES dans l'atmosphère provoque une rétention de la chaleur à un niveau tel que cela modifie le climat de la planète. Par ailleurs, les changements climatiques sont non seulement modulés par la présence de gaz à effet de serre, les principaux étant le H₂O, le CO₂, le CH₄ et le N₂O, mais également par l'effet de l'albédo de la surface terrestre.

Échanges nets avec l'écosystème (ENE)

Dans le milieu scientifique, les échanges nets avec l'écosystème se mesurent en CO₂e/ha/an. Ils sont le résultat de l'équation suivante :

$$\Sigma \text{Émissions} - \Sigma \text{séquestration} = \text{ENE}$$

Une forêt joue un rôle de puits de carbone lorsque ses ENE sont négatifs. Le calcul des ENE permet de comparer des territoires forestiers entre eux, afin de mettre en évidence leur performance à séquestrer le carbone atmosphérique (CO₂e). Pour des fins de simplification et de vulgarisation, le texte utilise le terme « **échanges nets** » lorsqu'il fait référence au concept d'ENE.

¹ Pan et coll., 2011

Depuis la révolution industrielle et l'utilisation accrue des énergies fossiles, la quantité de CO₂ a augmenté de façon significative dans l'atmosphère, passant de 288 ppm à 414 ppm. D'ici la fin du siècle et au rythme actuel des activités humaines, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère risque de doubler. Cette augmentation présente des conséquences sur la pérennité des écosystèmes dont dépendent de nombreuses espèces vivantes, notamment les populations humaines.

Les études sur le carbone forestier permettent de mieux comprendre la dynamique des flux échangés

Conversion C-CO₂

Les éléments étant composés d'atomes, il est possible de convertir une quantité de carbone (C), en quantité de dioxyde de carbone (CO₂). Le tableau périodique des éléments leur associe une masse moléculaire individuelle (g/mol) :

- ▶ Carbone : 12 g/mol
- ▶ Oxygène : 16 g/mol

Ainsi, la masse moléculaire du CO₂ est égale à : $12 + 2 \times 16 = 44$ g/mol. Pour convertir une quantité de CO₂ en C, il suffit de multiplier la valeur connue de CO₂ par le ratio 12/44. L'inverse du ratio (44/12) permet d'obtenir une valeur de CO₂ à partir d'une valeur connue de C.

En science du climat, il arrive que le C atmosphérique soit exprimé en CO₂ équivalent (CO₂e). Cette valeur tient compte de l'ensemble des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère en équivalent de CO₂. Dans ce rapport, les valeurs de carbone atmosphérique sont exprimées en unités CO₂e, car elles tiennent aussi compte des émissions de méthane (CH₄) causées par la décomposition des végétaux.

entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère, ainsi que d'identifier les meilleures avenues de mitigation. Tel que mentionné, le carbone peut être étudié selon trois concepts : les stocks, la productivité et les échanges nets. Le CO₂ s'accumule dans la biomasse végétale sous forme de stocks (tC/ha) dans les réservoirs forestiers : la matière ligneuse, les racines et le feuillage. Lorsque les arbres meurent, le carbone est transféré de la biomasse vivante vers la biomasse morte, puis décomposé dans les sols. La productivité d'un site (tC/ha/an) détermine le taux d'accumulation du carbone dans l'écosystème pour un territoire donné et évolue en fonction du temps. Elle dépend de la composition forestière (feuillue ou résineuse), de l'âge et de différents paramètres climatiques comme la quantité de précipitations annuelles. Lorsque la forêt dépasse le stade intermédiaire de son développement, qui varie en fonction des essences et des sites, sa productivité diminue et moins de carbone est accumulé dans le bois des arbres annuellement.

Les échanges nets (tCO₂e/ha/an) varient en fonction de l'âge du peuplement. Après un feu de

forêt ou une récolte, l'âge du peuplement est égal à zéro. Lors d'épidémies d'insectes, c'est la sévérité de celle-ci qui va déterminer l'âge du peuplement post-perturbation. Hormis les débris d'arbres en décomposition, la proportion plus faible d'arbres en croissance diminue la capacité de séquestration de la forêt. La perturbation provoque aussi une perte du carbone qui s'est emmagasiné dans le sol par une décomposition accrue et un certain temps est nécessaire avant que l'écosystème forestier recommence à séquestrer plus qu'il n'émet. En fonction du stade de développement d'un peuplement (jeune forêt vs forêt mature), les processus biologiques qui s'y déroulent émettent du CO₂ de manière plus ou moins équivalente à la capacité des arbres à séquestrer le carbone. La figure 1 résume les différents processus et les principaux stades du bilan carbone dans la forêt boréale.

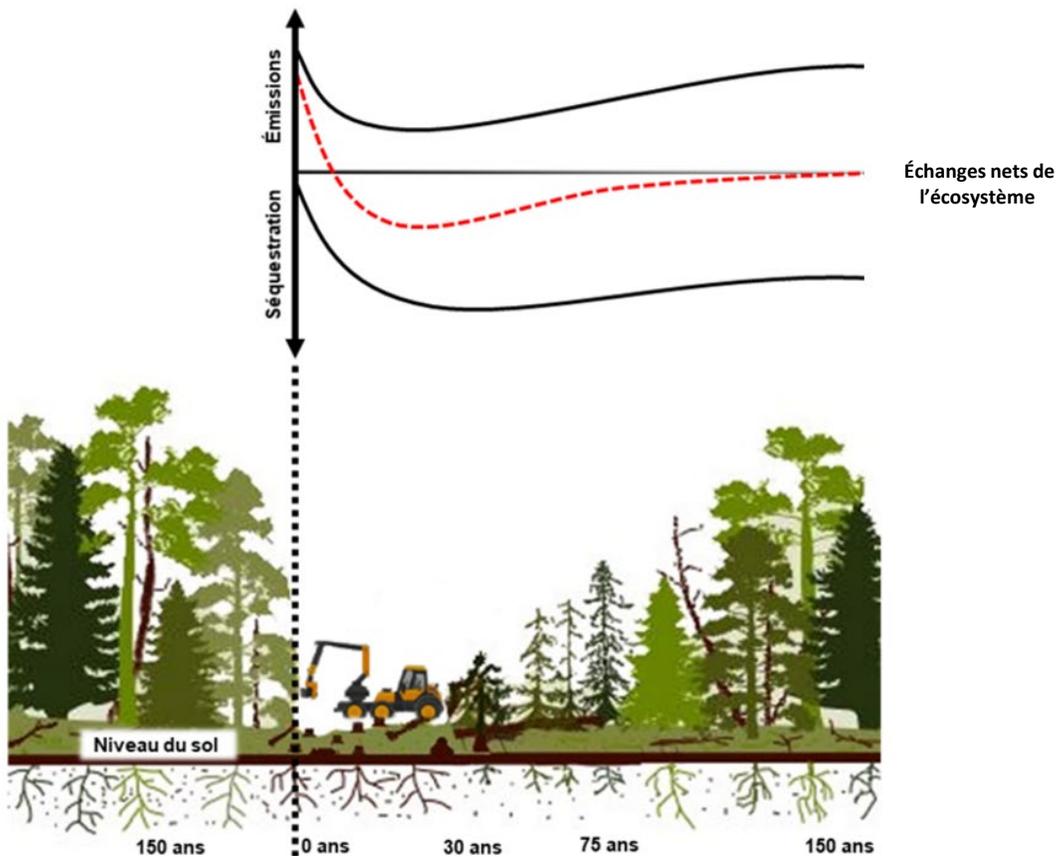


Figure 1. Évolution des échanges de carbone à l'échelle du peuplement à la suite de la récolte

Enfin, des micro-organismes décomposent les débris d'arbres morts, libérant le carbone solide vers l'atmosphère sous forme de CO₂. Le CO₂ est à nouveau séquestré par les arbres et le cycle de croissance de la végétation se poursuit jusqu'à la perturbation qui sera responsable du prochain événement de mortalité. En intervenant dans cette dynamique de façon à proposer des interventions en cohérence avec les recommandations scientifiques, l'aménagement forestier pourrait devenir un outil de mitigation des changements climatiques.

Comptabilisation du carbone

La mitigation des effets des changements climatiques s'inscrit dans un effort mondial et est encadrée par des ententes entre les différents pays. Parmi ces ententes, le *Protocole de Kyoto* et l'*Accord de Paris* sont deux instruments internationaux qui mettent en œuvre les recommandations de la *Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques*. Par ailleurs, cette dernière reconnaît le rôle contributeur des forêts aménagées, à la fois comme puits et comme source de carbone. C'est pourquoi, et en vertu de l'article 3 du *Protocole de Kyoto*, les pays signataires s'engagent à identifier les territoires forestiers affectés par les activités humaines, ainsi que d'en mesurer le bilan carbone, et ce, depuis 1990. En ratifiant ces deux accords, le Canada, et ainsi le Québec se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, en tenant compte des orientations convenues sur les territoires d'application.

La comptabilisation du carbone fait partie des principaux objectifs énoncés par le *Protocole de Kyoto* et l'*Accord de Paris*. Pour le secteur forestier, cet engagement consiste à assurer une cohérence entre l'aménagement des forêts et les pratiques recommandées par le *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat*, responsable d'évaluer l'état des connaissances sur les causes, les conséquences et les stratégies de lutte contre les changements climatiques. Le secteur forestier est considéré contributeur à la réduction des émissions de carbone dans l'atmosphère, à la condition d'une amélioration de son bilan global de carbone, lorsque comparé à un scénario de référence. À l'échelle des travaux du Forestier en chef, cela correspond à un aménagement forestier dont les émissions sont moindres et dont la production ligneuse est supérieure. Une première étape consiste donc à effectuer une analyse globale du bilan du carbone forestier afin d'identifier des avenues de solutions possibles.

Le Forestier en chef a développé des méthodes de modélisation permettant d'utiliser les outils de comptabilisation du carbone reconnus par la communauté scientifique, tel que le *Modèle générique du bilan du carbone* (MGBC). Le Forestier en chef y joint son expertise sur le calcul des possibilités forestières afin de dégager des résultats d'émissions et de séquestration du carbone, qui soient cohérents avec l'aménagement forestier du Québec. La section *Méthodologie* trace le portrait des approches et des outils utilisés dans le cadre de la comptabilisation présentée dans ce rapport.

Méthodologie

En 2018, le Forestier en chef s'est engagé à développer une plateforme de comptabilisation et de suivi du carbone forestier pour les forêts publiques québécoises. À cet effet, une entente avec le *Service canadien des Forêts* a permis au Forestier en chef d'obtenir l'accès au *Modèle générique du bilan du carbone du secteur forestier* (MGBC), un outil qui estime l'évolution des stocks (tC/ha) et des échanges nets de carbone par les forêts (tCO₂e/ha/an). La méthode mise en œuvre par MGBC est basée sur le guide des bonnes pratiques du *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat*. Le Forestier en chef a également mis sur pied une interface permettant d'exporter les résultats du calcul des possibilités forestières sous une forme adéquate pour les besoins de MGBC.

Modèle générique du bilan carbone (MGBC)

MGBC vise à produire des estimations sur le carbone qui soient complètes, précises dans le temps, comparables entre les régions et qui tiennent compte des particularités régionales. Le modèle est construit à l'échelle du peuplement et du paysage, permettant d'illustrer l'étendue des changements dans la structure d'âge des peuplements, mais aussi dans le type d'aménagement forestier de manière spatialement explicite, c'est-à-dire, positionné à un endroit précis sur une carte. Le modèle traite l'information sur le carbone en tenant compte de la biomasse aérienne et souterraine, de même que de la biomasse morte et du sol. Par ailleurs, MGBC simule la mortalité de la biomasse de façon dynamique, car il y a un transfert continu entre la biomasse vivante vers la biomasse morte. Les émissions de carbone résultent de la décomposition de la biomasse morte ou de l'oxydation directe dans l'atmosphère par le feu.



FMT

Le calcul des possibilités forestières est réalisé à l'aide du logiciel Woodstock qui permet une optimisation par programmation linéaire. Les actions planifiées par l'optimisation sont définies dans l'espace, mais pas à une échelle aussi fine que ce qui est requis pour en faire une analyse avec le calculateur MGBC. Afin de lier les outils utilisés pour le calcul des possibilités forestières à ceux sur la comptabilisation du carbone, le Forestier en chef a développé l'interface logicielle FMT qui permet de lire des modèles d'optimisation de manière à transformer l'information forestière du calcul des possibilités forestières sous un format matriciel, convenable à la lecture des données dans MGBC.

Analyses statistiques

Les 29 unités d'aménagement ayant un nouveau calcul des possibilités forestières pour la période 2023-2028 représentent un échantillon non représentatif des 57 unités d'aménagement. En effet, la sélection des 29 unités d'aménagement pour le calcul 2023-2028 a été dictée par la progression des livraisons des résultats de l'inventaire écoforestier. Dans le calcul des possibilités forestières, les forêts sont classées selon quelles peuvent être aménagées et dites *incluses* aux actions de modélisation donc aptes à être aménagées. D'autres sont exclues de l'aménagement pour des raisons de conservation (aires protégées) ou biophysiques (pentes, faible boisement, etc.). La valeur des échanges nets cumulatifs (tCO₂e/ha) a été calculée en fonction de ces superficies incluses et exclues pour les 29 unités d'aménagement analysées, puis estimée pour l'ensemble des unités d'aménagement. Le modèle MGBC procédant sur une base annuelle, les résultats ont été ramenés à une valeur par période de 5 ans, comme pour les possibilités forestières.

Une analyse en composantes principales a été effectuée afin d'illustrer le lien de corrélation entre les variables reliées au carbone et celles reliées à la forêt. Celles-ci sont décrites au tableau 1.

Les variables INVEST, JX, VX, CPCT, INVEST, REB, VOLREC et VOLMOY sont de nouvelles variables explicatives. Elles ont été dérivées à partir des extraits du calcul des possibilités forestières.

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique qui permet de réduire les dimensions d'un problème contenant plusieurs variables. Le résultat de l'analyse en composantes principales est représenté par une série de points sur un graphique. Chaque point correspond à la position d'une unité d'aménagement par rapport aux variables présentées. Plus le point est orienté à l'extrémité d'une variable, plus la valeur que l'unité d'aménagement possède pour cette variable est élevée. La longueur des vecteurs (flèches) indique à quel point la variable est bien représentée par le graphique. Dans un modèle parfait, les vecteurs auraient tous une longueur égale. L'angle entre les vecteurs représente la corrélation entre deux variables. Si l'angle est égal à zéro et que les vecteurs se superposent, les variables sont dites colinéaires. Elles offrent la même information. Si l'angle est de 90 degrés, les variables sont orthogonales et ne possèdent aucune relation entre elles et sont dites indépendantes. Plus l'angle entre les vecteurs est petit, plus les variables sont corrélées. Si les flèches s'opposent, alors les variables sont colinéaires, mais négativement corrélées. Lorsque la valeur d'une variable augmente, la valeur de celle qui lui est opposée diminue.

Bilan provincial du carbone forestier

Puisque les constats scientifiques pointent vers une influence marquée du climat sur la capacité des écosystèmes à emmagasiner le carbone, une variable décrivant la latitude des unités d'aménagement a été ajoutée aux données à analyser. Celle-ci permet de vérifier l'influence géographique (Nord, Sud, Centre) sur le bilan carbone des unités d'aménagement à partir de la position de leur centroïde. Une analyse en composantes principales sur l'ensemble des variables de suivi du carbone et des variables forestières a permis de dégager des tendances de regroupement des unités d'aménagement.

Tableau 1. Description des variables utilisées dans l'analyse en composantes principales

Variable forestière	Description	Variable forestière	Description
OSUPEXIN	Superficie exclue de l'aménagement forestier	OVOLTOTREC	Volume total récolté
OSUPINC	Superficie destinée à l'aménagement forestier	OVOLTOTPIEDINC	Volume total sur pied situé dans la superficie destinée à l'aménagement forestier
OSUPTOT	Superficie totale de l'unité d'aménagement (toutes catégories de superficie)	CPCT	Ratio de superficie des coupes partielles par rapport aux coupes totales (CP/CT)
OSUPREALREGAPAR	Superficie traitée toutes coupes partielles confondues	INVEST	Moyenne des investissements par hectare
OSUPREALACT	Superficie traitée en coupe totale	REB	Taux de reboisement (OSUPREALAPL/ OSUPREALACT)
O\$INVESTITS	Budget investi en aménagement forestier	VOLREC	Ratio de volume récolté sur le volume sur pied (OVOLTOTREC/ OVOLTOTPIEDINC)
OSUPREALAPL	Superficie de plantation sur les territoires destinés à l'aménagement forestier	VOLMOY	Volume moyen dans la superficie étudiée (OVOLTOTPIEDINC/ (OSUPINC+OSUPEXIN))
JX	Ratio de forêt de classe 10	VX	Ratio de forêt de classe 120



Résultats

Superficie

La section des résultats présente les données sur le carbone forestier pour les 29 unités d'aménagement analysées. Il est pertinent de mettre en évidence leurs détails individuels afin de mieux comprendre et évaluer leur contribution au bilan de carbone. À titre de référence, les unités d'aménagement 086-64 et 024-71 représentent la plus petite et la plus grande à l'étude. Elles possèdent respectivement des superficies de 156 630 hectares et de 1 842 450 hectares. Ainsi, l'unité d'aménagement 024-71 est 11 fois plus grande que la 086-64. Le tableau 2 présente les superficies forestières des unités d'aménagement utilisées pour le calcul du carbone. Elles sont distinguées entre celles où la récolte et la sylviculture sont permises appelées « incluses à l'aménagement » et les forêts où il n'y a pas d'activités forestières permises appelées « exclues de l'aménagement ». Les superficies incluses sont évidemment celles qui supportent les possibilités forestières. Les superficies qui ne sont pas forestières : tourbières, dénudés secs, lacs ne sont pas considérées dans ces totaux, ni dans les travaux sur le carbone forestier.

Bien qu'elles ne figurent pas parmi les superficies les plus importantes, les unités d'aménagement suivantes possèdent une grande proportion ($\geq 80\%$) de leur superficie qui est destinée à l'aménagement forestier : 026-51, 071-51, 071-52, 073-51, 074-51, 026-64, 026-65, 026-66, 086-65, 087-62, 087-63, 87-64. Les unités d'aménagement 037-72 (58 %), 072-51 (58 %) 026-63 (34 %), 086-83 (22 %) et 086-66 (58 %) possèdent les plus faibles proportions de superficies destinées à l'aménagement.

Une telle comparaison permet de mieux comprendre l'effet de l'intervention humaine sur la capacité des écosystèmes à emmagasiner le carbone. Les résultats sur le carbone devraient être observés à la lumière de la taille relative des unités d'aménagement, ainsi que des ratios de territoire destinés à l'aménagement. Le tableau 2 présente un sommaire par unité d'aménagement selon les deux types de superficies.

Tableau 2. Superficies par unité d'aménagement et par région pour la période 2023-2028

Régions	Unités d'aménagement	Superficie destinée à l'aménagement forestier		Superficie exclue de l'aménagement forestier		Superficie utilisée pour le calcul carbone
		Hectares	%	Hectares	%	Hectares
Saguenay-Lac-Saint-Jean	024-71	1 372 920	75	469 530	25	1 842 450
	027-51	819 670	83	170 920	17	990 590
Capitale-Nationale	037-71	214 810	73	78 370	27	293 180
	037-72	332 020	58	239 970	42	571 990
Mauricie	026-51	146 400	88	19 100	12	165 500
Outaouais	071-51	180 180	80	44 130	20	224 310
	071-52	424 730	85	73 400	15	498 130
	072-51	90 880	58	66 800	42	157 680
	073-51	305 970	85	53 080	15	359 050
	073-52	286 180	75	92 950	25	379 130
	074-51	713 450	89	89 700	11	803 150
Côte-Nord	093-51	1 287 810	77	393 030	23	1 680 840
	093-52	436 590	49	450 250	51	886 840
	094-71	1 181 520	67	569 680	33	1 751 200
	097-51	909 490	73	335 100	27	1 244 590
Nord-du-Québec	026-61	298 200	60	201 470	40	499 670
	026-62	166 800	69	75 380	31	242 180
	026-63	99 390	34	193 240	66	292 630
	026-64	311 440	81	73 120	19	384 560
	026-65	258 960	87	39 250	13	298 210
	026-66	161 600	86	26 410	14	188 010
	085-51	410 730	71	167 680	29	578 410
	086-63	40 400	22	141 760	78	182 160
	086-64	102 280	65	54 350	35	156 630
	086-65	182 180	83	36 430	17	218 610
	086-66	182 200	58	133 710	42	315 910
	087-62	265 940	87	38 310	13	304 250
	087-63	233 400	80	58 040	20	291 440
	087-64	249 620	90	26 230	10	275 850
Total		11 665 760		4 367 260		16 077 150



Bilan général du carbone forestier

Stocks

Les stocks de carbone correspondent à la quantité totale de carbone emmagasiné dans les réservoirs forestiers en tonnes de carbone solide par hectare (tC/ha). En 2020, une estimation réalisée par le Forestier en chef avait permis d'estimer la valeur totale des stocks pour l'ensemble des unités d'aménagement de la province à environ 6 milliards de tC. Pour le calcul actuel (2023-2028), la superficie totale des 29 unités d'aménagement à l'étude est de 16 077 150 hectares. Celle-ci est associée à une valeur totale de stock de 2,97 milliards tC. Lorsqu'extrapolée sur l'ensemble des 31 512 540 hectares de forêt productive, la valeur totale des stocks est estimée à 5,82 milliards de tC. Les valeurs sont donc assez similaires, même si provenant de sources différentes.

La figure 2 illustre la différence relative des stocks moyens pour l'ensemble des réservoirs. Cette valeur inclut toutes les superficies. Chaque classe de couleur représente une période du calcul des possibilités forestières soit : le début de la comptabilisation (2023-2028), la moitié de l'horizon (2083-2088) et la fin de l'horizon (2158-2163).

La moyenne pondérée des stocks pour les trois périodes révèle une tendance à la baisse entre les périodes 2023-2028, 2083-2088 et 2158-2163. À la période 2023-2028, les réservoirs forestiers contiennent en moyenne 188 tC/ha. Cette valeur est de 182 tC/ha pour 2083-2088 et de 178 tC/ha pour 2158-2163. Ceci représente une diminution moyenne de 10 tC/ha soit 5% de 2023 à 2163 pour les unités d'aménagement analysées. Les baisses de stocks de carbone et leur répartition spatiale sont illustrées à la figure 3.

Bilan provincial du carbone forestier

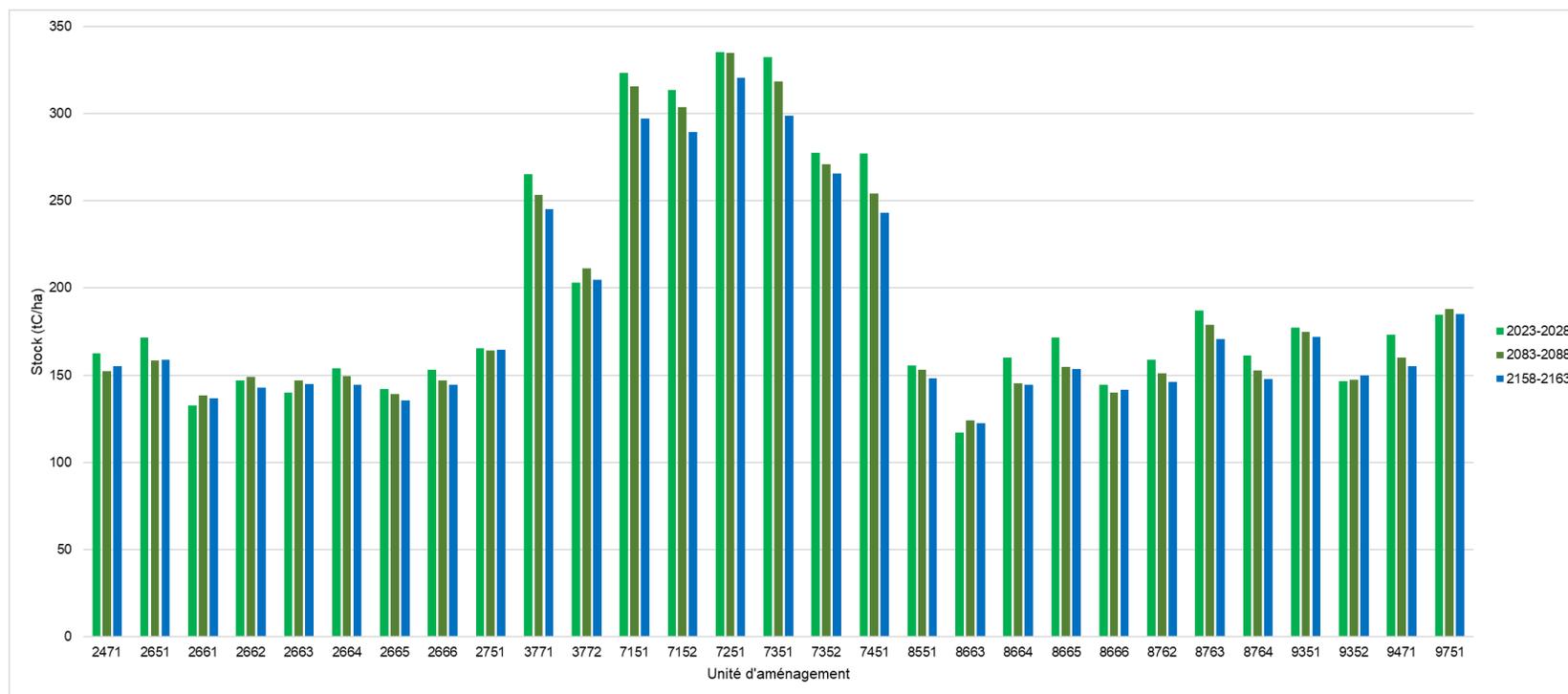


Figure 2. Évolution des stocks de carbone (tC/ha) dans l'écosystème forestier des unités d'aménagement selon trois périodes quinquennales

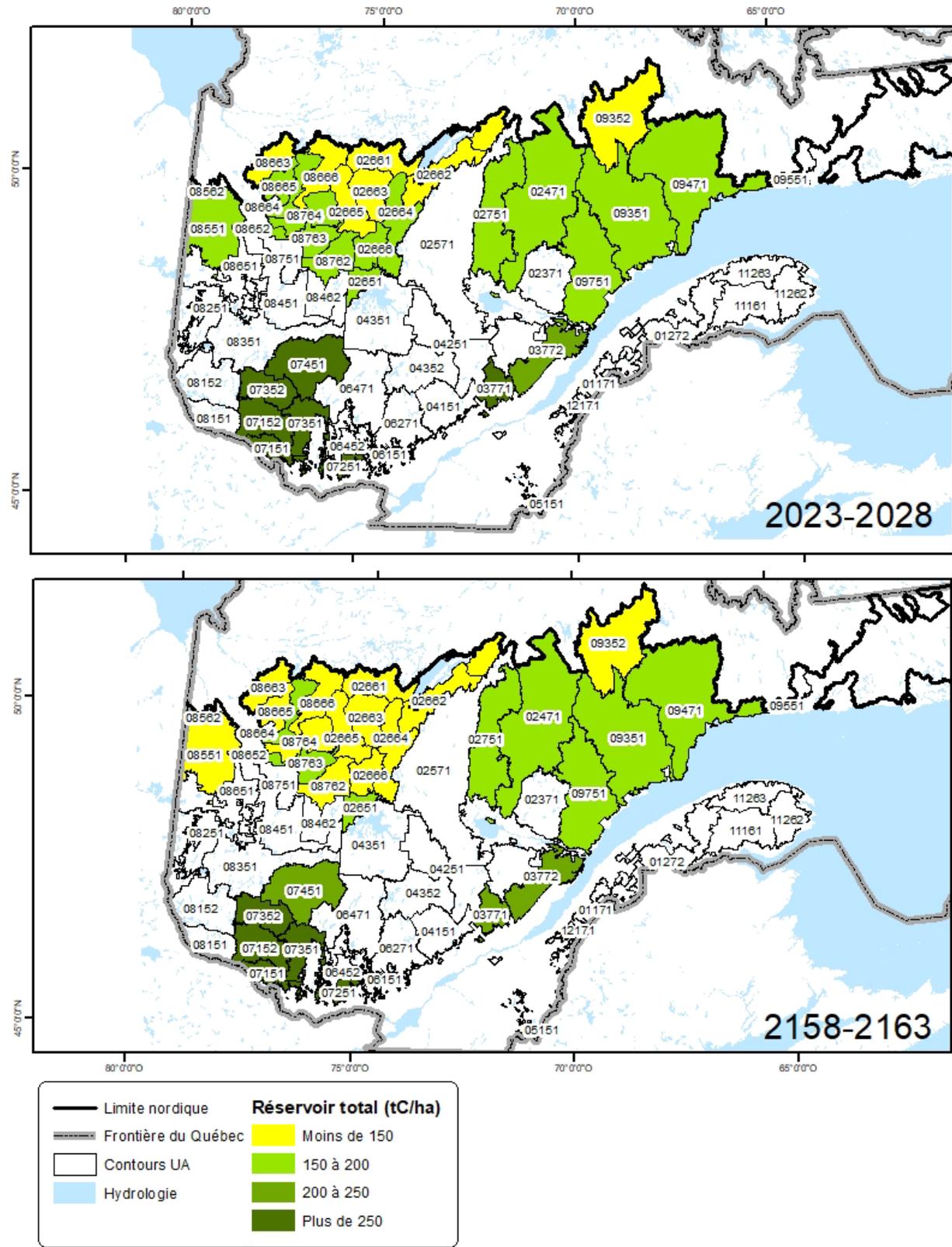


Figure 3. Répartition géographique des stocks de carbone pour les 29 unités d'aménagement analysées pour les périodes 2023-2028 et 2158-2163

Échanges nets de l'écosystème

Le tableau 3 présente les valeurs des échanges nets de l'écosystème en tCO₂e/ha/an par unité d'aménagement. La variation entre la valeur des échanges nets pour la première et la dernière période permet de comparer la performance de séquestration du carbone entre le début et la fin de l'horizon de calcul des possibilités forestières. Si la variation est négative, l'unité d'aménagement séquestre plus de carbone au bout de l'horizon qu'elle ne le faisait en début. À l'opposé, si la variation est positive ou supérieure à la période initiale, la capacité de séquestration diminue dans le temps. Les unités d'aménagement 024-71, 027-51 et 026-51 sont celles qui évoluent de manière à séquestrer de plus en plus de carbone dans le temps. À l'inverse, l'unité d'aménagement 072-51 semble démontrer une capacité de séquestration qui diminue. À noter que le tableau 3 présente des variations relatives, c'est-à-dire qu'elles sont comparées en fonction de la capacité initiale de chaque unité d'aménagement à séquestrer du carbone. Par exemple, une unité d'aménagement peut présenter une diminution de sa capacité à capter le CO₂ dans le temps, mais représenter un puits de carbone d'envergure.

La figure 4 présente les échanges nets cumulatifs par type de superficie et pour tout l'horizon. Elle permet de comparer la capacité des unités d'aménagement à séquestrer du carbone. La valeur cumulative de tCO₂e/ha permet d'obtenir une base comparative entre elles. Cette valeur est calculée en multipliant par cinq les échanges annuels afin d'obtenir une valeur par période et ensuite en faisant la somme de ce résultat pour chaque période de l'horizon analysé.

Pour chaque période, la valeur totale de CO₂e captée a été soustraite de la valeur totale de CO₂e émise par la forêt. En fin d'horizon, ce sont les unités d'aménagement de la région de l'Outaouais qui démontrent la meilleure capacité de séquestration cumulative. À l'inverse, les UA 093-52 et 094-71 de la région de la Côte-Nord présentent la capacité de séquestration la plus faible. Pour l'an 2163, les 29 unités d'aménagement pourront séquestrer en moyenne 106 tCO₂e/ha, ce qui représente un potentiel total de 1,7 milliard de tCO₂e retenues par la forêt pour la superficie à l'étude.

Lorsqu'on extrapole pour l'ensemble des unités d'aménagement, la valeur de tCO₂e qui pourrait être séquestrée par l'écosystème, donc sans tenir compte des stocks et émissions provenant des produits forestiers, est de 3,3 milliards. Dans l'ensemble cumulatif de l'horizon de calcul, la forêt aménagée (bâtonnet vert foncé) constitue un puits de carbone. Certaines unités d'aménagement, comme la 026-51, comprennent des territoires non aménagés (bâtonnet bleu) qui deviennent sources de carbone lorsque les échanges de carbone entre la forêt et l'atmosphère sont cumulés dans le temps.



Tableau 3. Variation des échanges nets de carbone par unité d'aménagement au début, au milieu et à la fin de l'horizon

Régions	Unités d'aménagement	2023-2028	2083-2088	2158-2163	Variation
		(tCO ₂ e/ha/an)	(tCO ₂ e/ha/an)	(tCO ₂ e/ha/an)	(tCO ₂ e/ha/an)
Saguenay-Lac-Saint-Jean	024-71	0,59	-1,19	-0,96	-1,55
	027-51	0,75	-1,87	-0,98	-1,73
Capitale-Nationale	037-71	-1,38	-1,11	-0,87	0,51
	037-72	-1,92	-0,82	-0,99	0,93
Mauricie	026-51	0,74	-1,04	-0,91	-1,65
Outaouais	071-51	-2,94	-1,42	-1,45	1,49
	071-52	-1,92	-1,37	-1,53	0,39
	072-51	-2,99	-1,04	-1,10	1,89
	073-51	-2,3	-1,18	-1,68	0,62
	073-52	-1,91	-1,10	-1,09	0,82
	074-51	-1,85	-1,05	-1,36	0,49
Côte-Nord	093-51	-0,20	-0,94	-0,88	0,68
	093-52	0,08	-0,27	-0,26	0,34
	094-71	0,65	-0,37	-0,17	0,82
	097-51	-0,52	-1,11	-0,89	0,37
Nord-du-Québec	026-61	0,07	-0,74	-0,93	-1,00
	026-62	0,12	-0,83	-0,83	-0,95
	026-63	-0,58	-0,55	-0,45	0,13
	026-64	-0,31	-0,71	-1,02	-0,71
	026-65	-0,06	-0,90	-1,12	-1,06
	026-66	-0,57	-0,65	-0,79	-0,22
	085-51	-0,49	-0,43	-0,54	-0,05
	086-83	-0,06	-0,29	-0,05	0,01
	086-64	0,08	-0,47	-0,72	-0,80
	086-65	0,03	-0,69	-0,94	-0,97
	086-66	0,04	-0,5	-0,83	-0,87
	087-62	0,16	-0,96	-0,87	-1,03
	087-63	-0,88	-0,63	-0,57	0,31
	087-64	-0,22	-0,69	-0,86	-0,64

Bilan provincial du carbone forestier

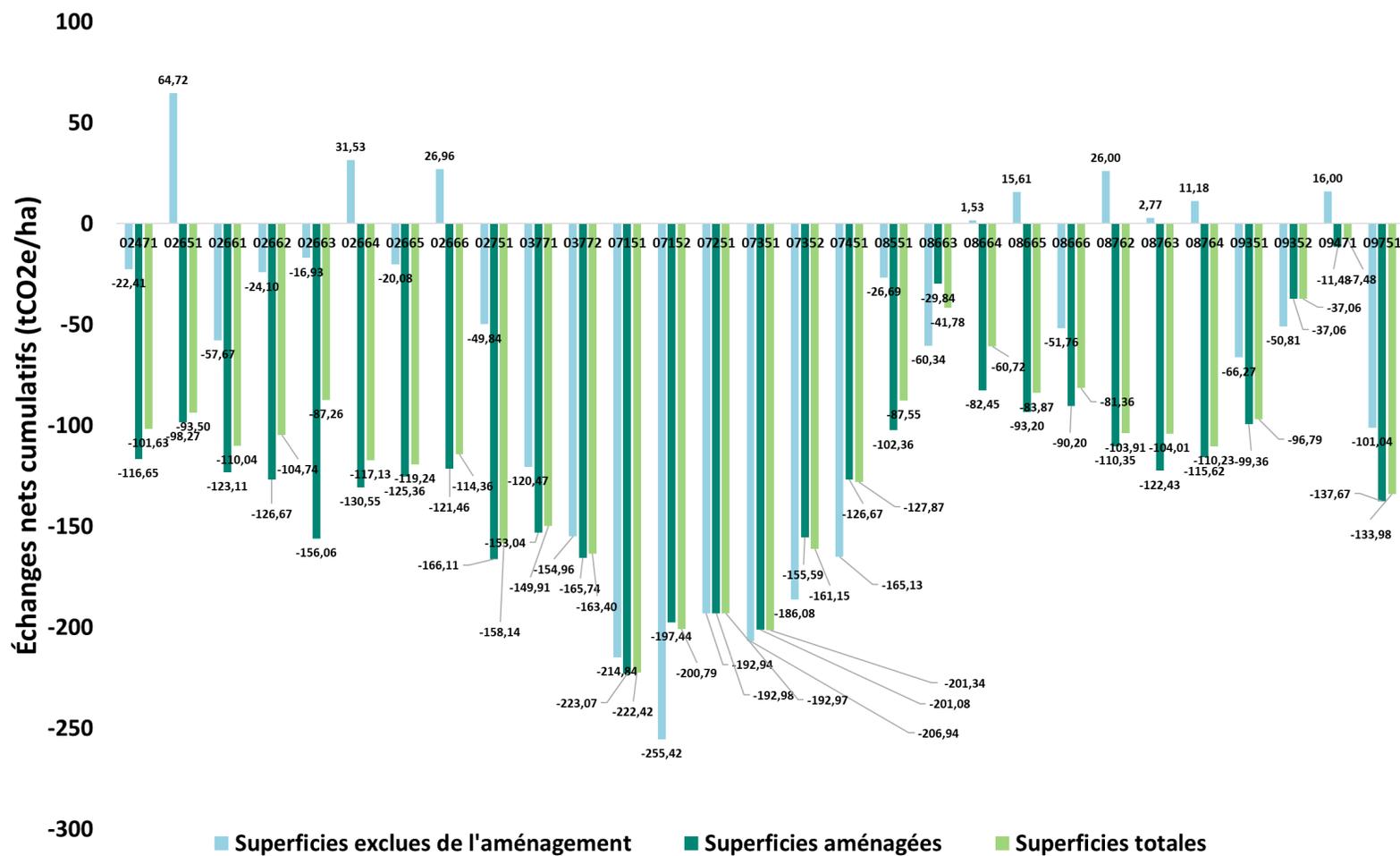


Figure 4. Échanges nets de l'écosystème (tCO₂e/ha) cumulatifs de 2023 à 2163 par unité d'aménagement



La figure 5 présente la répartition spatiale des échanges nets dans les 29 unités d'aménagement ayant un nouveau calcul pour la période 2023-2028.

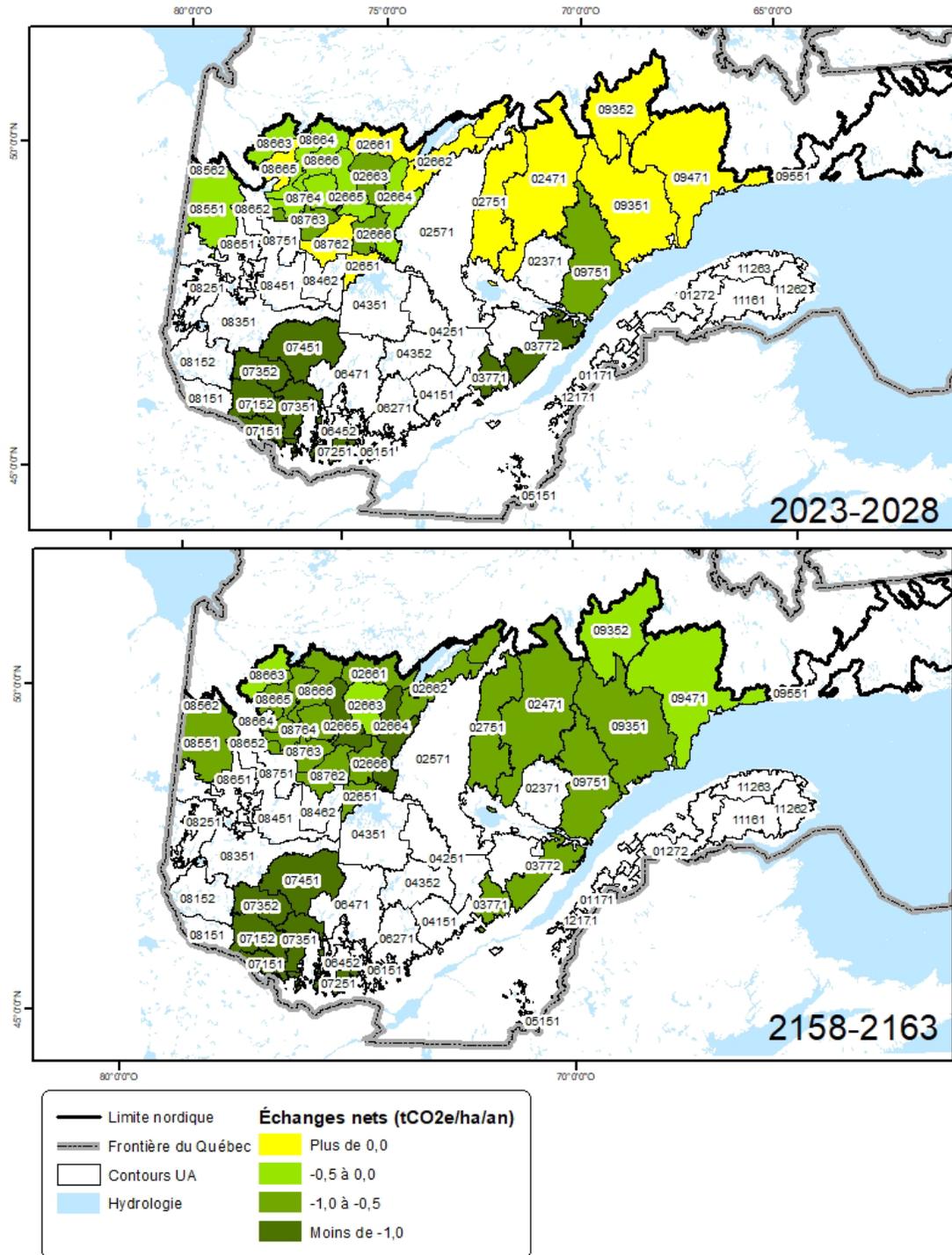


Figure 5. Répartition géographique des échanges nets de carbone pour les 29 unités d'aménagements analysées pour les périodes 2023-2028 et 2158-2163

Productivité

Le terme généralement utilisé dans la littérature est *Productivité primaire nette*, dans le présent rapport, le terme *Productivité* est employé pour faciliter la lecture. La figure 6 présente la productivité (tC/ha/an) des 29 unités d'aménagement. Les résultats ont été répartis selon les superficies incluses et exclues de l'aménagement. Les données brutes sont présentées à l'annexe 2.

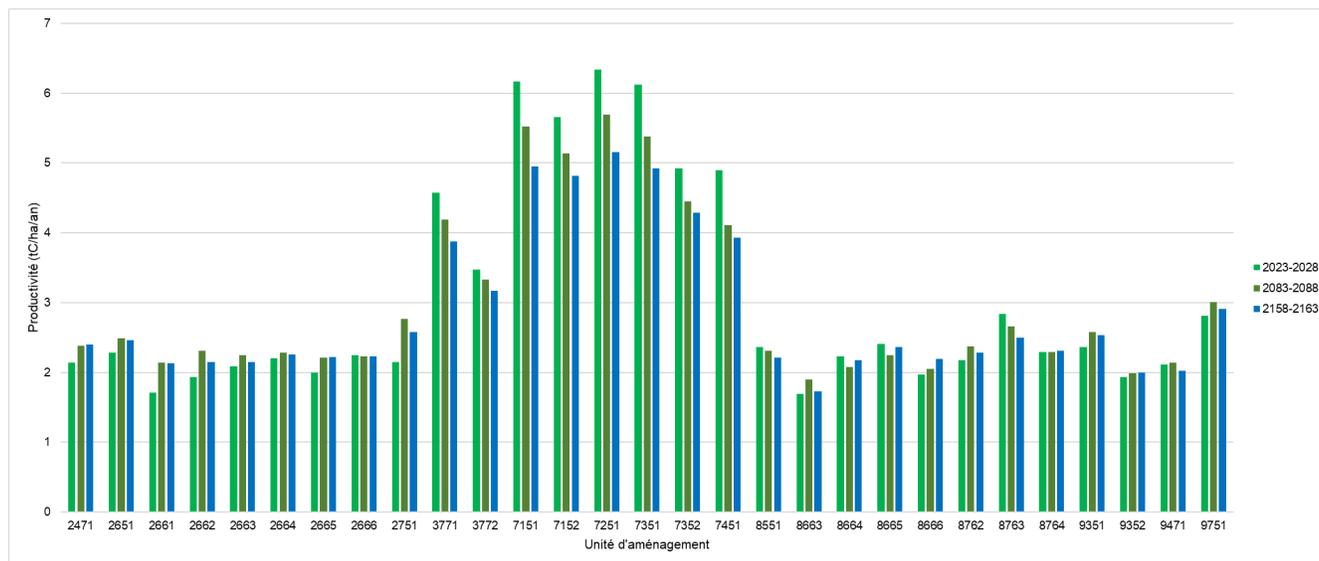


Figure 6. Productivité (tC/ha/an) par unité d'aménagement pour les périodes 2023-2028, 2083-2088 et 2158-2163

Pour la majorité des unités d'aménagement, la productivité semble être relativement stable sur l'ensemble de l'horizon de temps. Toutefois, dans les régions de la Capitale-Nationale et de l'Outaouais, les territoires les plus productifs sont marqués par une décroissance de leur productivité dans le temps. La variation de la productivité entre 2023-2028 et 2158-2163 est présentée au tableau 4. Des pourcentages positifs signifient qu'il y a une augmentation de la productivité, alors qu'une valeur négative démontre une baisse de productivité sur l'horizon.

Pour l'ensemble des 29 unités d'aménagement analysées, une diminution globale de la productivité est observée sur l'horizon. En 2023, la productivité moyenne est de 2,8 tC/ha/an et elle se termine à 2,7 tC/ha/an en 2163, soit 44,9 et 43,8 millions de tonnes de carbone respectivement lorsque calculée pour l'ensemble de la superficie des territoires analysés. Ceci correspond à une baisse de productivité annuelle de 1,1 million de tonne de carbone en 2163 soit ~2,5 % plus faible que celle observée en 2023. La baisse annuelle estimée pour l'ensemble des 57 unités d'aménagement de la province est de 2,2 millions de tonnes de carbone en l'an 2163.



Tableau 4. Variation de la productivité moyenne par unité d'aménagement entre les périodes 2023-2028 et 2158-2163

Régions	Unités d'aménagement	Variation	Régions	Unités d'aménagement	Variation
		%			%
Saguenay-Lac-Saint-Jean	024-71	12	Nord-du-Québec	026-61	18
	027-51	20		026-62	14
Capitale-Nationale	037-71	-15		026-63	19
	037-72	-9		026-64	4
Mauricie	026-51	8		026-65	11
Outaouais	071-51	-20		026-66	-1
	071-52	-15		085-51	-6
	072-51	-19		086-83	4
	073-51	-20		086-64	-2
	073-52	-13		086-65	-2
	074-51	-20		086-66	11
Côte-Nord	093-51	7		087-62	5
	093-52	4		087-63	-12
	094-71	-4		087-64	1
	097-51	4			

Les régions de la Capitale-Nationale et de l'Outaouais affichent les variations négatives les plus importantes et, par conséquent, les plus fortes baisses de productivité entre les périodes. Trois unités d'aménagement présentent des baisses de 20 % : 071-51, 073-51 et 074-51. Leurs productivités sont de 6,17 tC/ha/an, 6,12 tC/ha/an et 4,90 tC/ha/an pour 2023-2028 et seront 4,95, 4,92 et 3,93 tC/ha/an en 2158-2163. À l'inverse, l'unité d'aménagement 027-51 présente une augmentation de 20 % de sa productivité, passant de 2,15 à 2,58 tC/ha/an à la fin de l'horizon. La différence de variation entre les unités d'aménagement de la région Nord-du-Québec est particulièrement importante. En effet, l'unité d'aménagement 087-63 enregistre une perte de productivité de 12 %, alors que la 026-63 présente un gain de productivité de 19 %.

La figure 7 illustre la variation de la productivité dans le temps. Les unités d'aménagement de l'Outaouais ont des productivités supérieures, et ce, pour tout l'horizon. Toutefois, la productivité de cette région diminue de façon graduelle dans le temps.

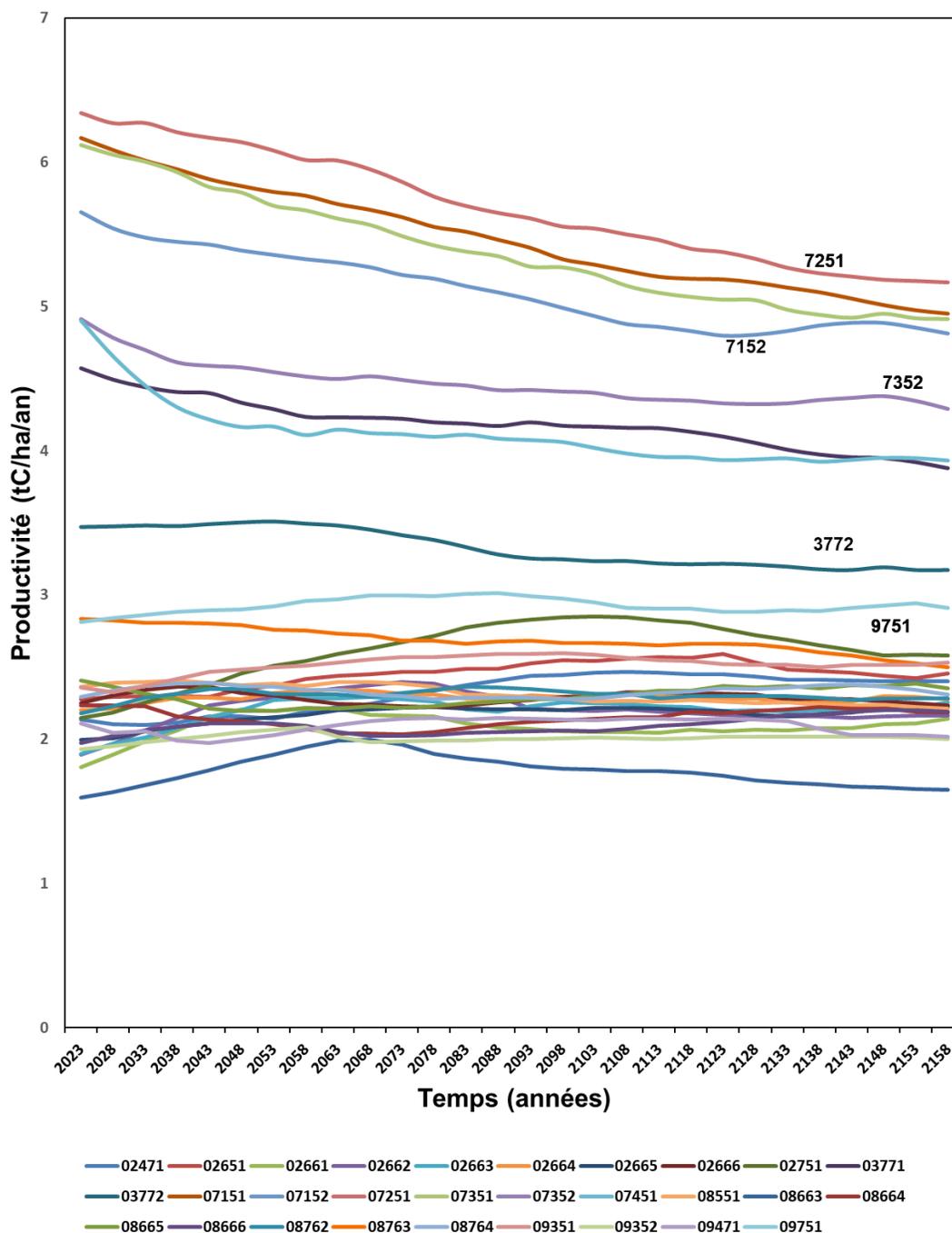


Figure 7. Évolution des productivités annuelles moyennes (tC/ha/an) pour la superficie totale des 29 unités d'aménagement sur l'ensemble de l'horizon

La productivité a également été étudiée distinctement pour la superficie destinée à l'aménagement forestier et celle exclue de l'aménagement forestier. La figure 7 illustre la productivité associée à la superficie totale alors que la figure 8 représente la productivité pour les superficies exclues de l'aménagement seulement.



Pour éviter la redondance, le graphique sur la productivité des superficies destinées à l'aménagement n'est pas inclus dans ce rapport. En effet, les superficies destinées à l'aménagement présentent un comportement des courbes qui est semblable à celui pour la productivité moyenne de la superficie totale. Cependant, la productivité dans les superficies exclues de l'aménagement démontre un comportement différent. L'effet de diminution de la productivité dans la région de l'Outaouais est absent dans les territoires exclus de l'aménagement. À noter que la productivité des superficies exclues de l'unité d'aménagement 087-63 diminue dans le temps.

Il faut cependant souligner que le fait de laisser croître les forêts dans les superficies exclues amène celles-ci dans une zone incertaine des courbes de croissance. En effet, il existe peu de connaissances sur l'évolution à si long terme des forêts tant dans les placettes-échantillons permanentes qui alimentent les modèles de croissance que dans les modèles de calcul eux-mêmes.

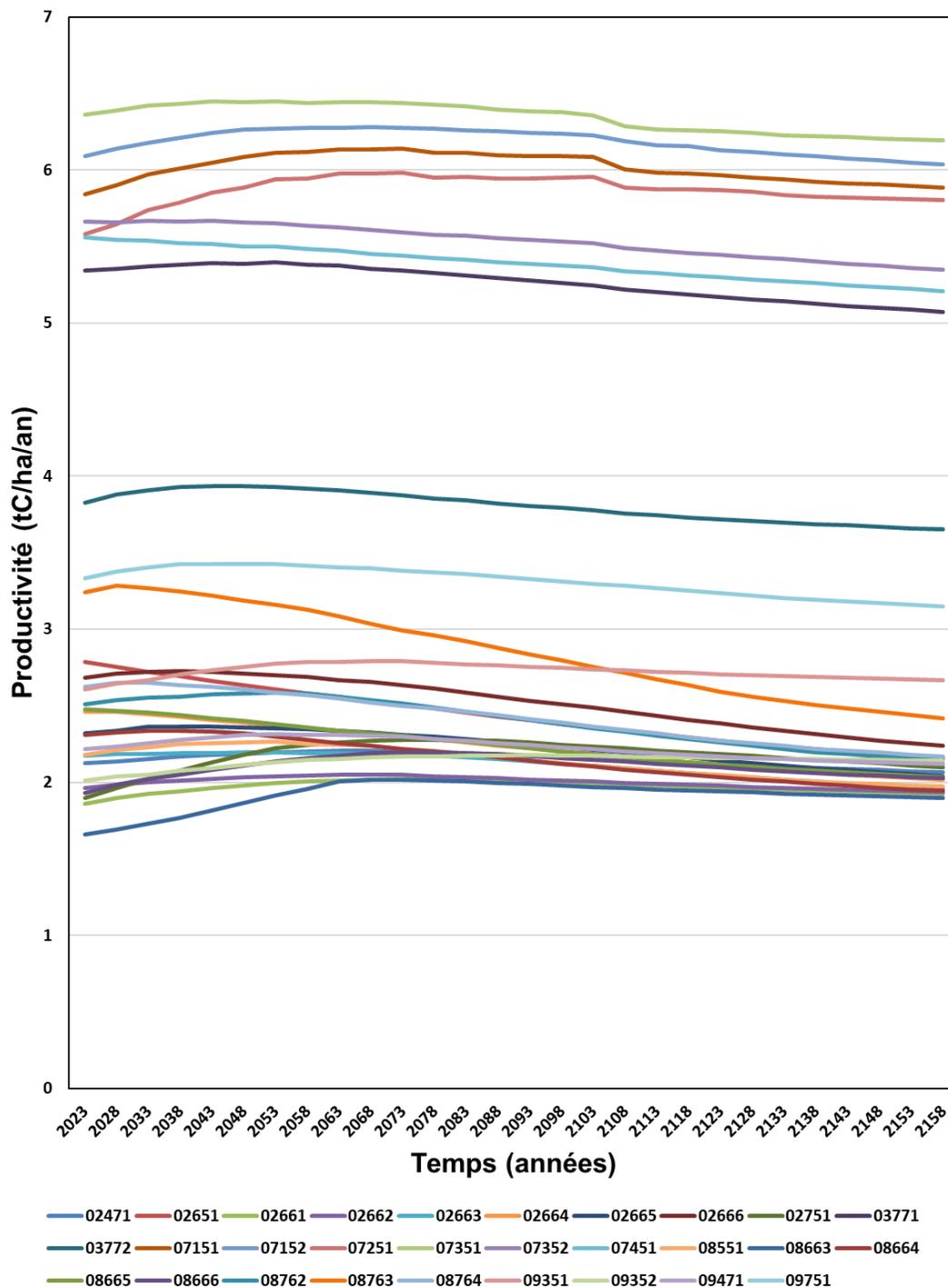


Figure 8. Évolution des productivités annuelles (tC/ha/an) pour les superficies exclues de l'aménagement forestier des 29 unités d'aménagement sur l'ensemble de l'horizon

La figure 9 illustre de manière cartographique la répartition spatiale de la productivité moyenne pour la première et la dernière période de l'horizon. Les unités d'aménagement juxtaposées à la limite territoriale des forêts attribuables, à l'exception de la 086-63, ont une augmentation de leur productivité, passant de moins de 2,0 à près de 2,5 tC/ha/an.

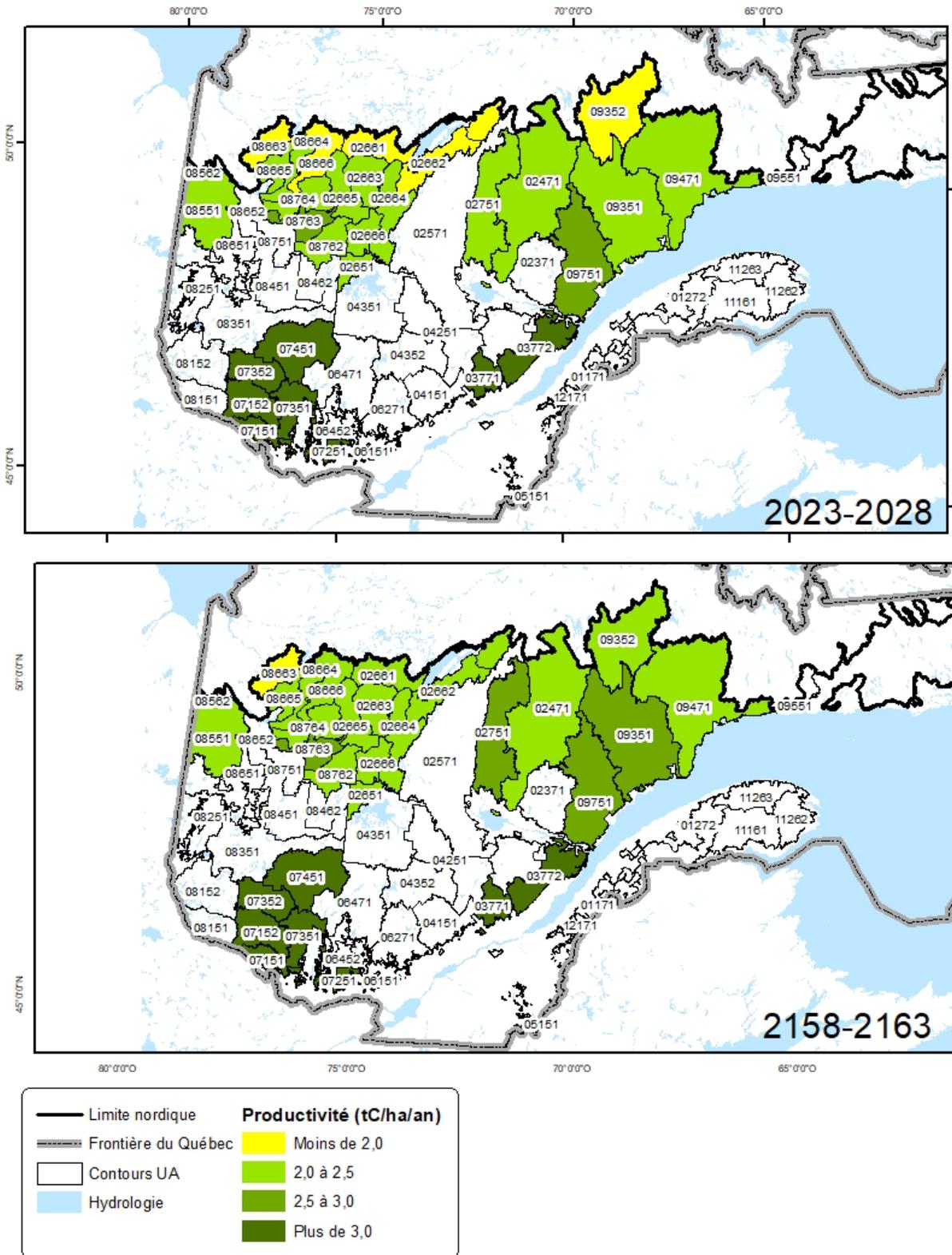


Figure 9. Répartition géographique des productivités (tC/ha/an) de carbone des 29 unités d'aménagement analysées pour les périodes 2023-2028 et 2158-2163

Analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales fait ressortir l'effet des variables les unes par rapport aux autres et permet le regroupement des unités d'aménagement en fonction des variables explicatives. Les deux premières composantes principales décrivent 55,6 % de la variabilité des données. Ainsi, 44,4 % de leur variabilité ne sont pas expliqués dans l'analyse (figure 10). Il est possible de remarquer quelques tendances :

1. Les unités d'aménagement sont regroupées en fonction de leur emplacement géographique (Nord, Centre, Sud)
2. Les unités d'aménagement du Nord, situées dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses, sont caractérisées par des émissions de carbone qui augmentent avec la latitude.
3. Les unités d'aménagement du Sud, situées dans l'érablière à bouleau jaune, présentent des valeurs élevées pour le ratio coupes partielles/coupes totales pour les stocks de carbone de même que pour les investissements (\$/ha).
4. Les variables investissements (\$/ha), stocks et le ratio coupes partielles/coupes totales sont positivement corrélées, c'est-à-dire qu'elles évoluent dans le même sens. Lorsque le ratio entre les superficies de coupes partielles et de coupes totales augmente, la valeur des investissements (\$/ha) et la valeur des stocks augmentent aussi.
5. Il existe une forte corrélation entre les investissements par unité de carbone séquestrée (\$/CO₂), le volume moyen récolté et la productivité.
6. Plus les superficies de vieilles forêts sont élevées, moins il y a de reboisement.

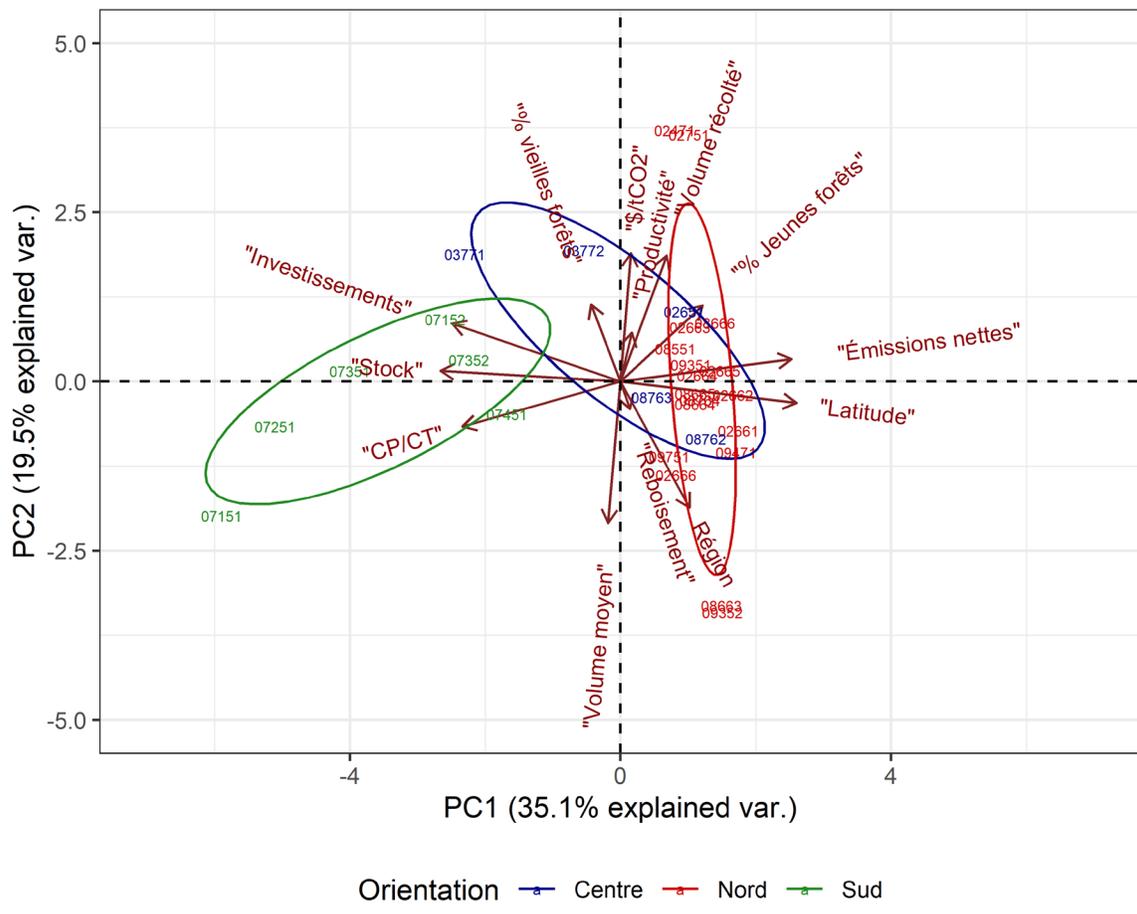


Figure 10. Résultats de l'analyse en composantes principales

Le corrélogramme de la figure 11 illustre également la relation entre les variables étudiées. La légende à gauche décrit le niveau de relation entre les variables. Les cercles verts représentent une relation positive alors que les cercles bruns représentent une relation négative. La relation est dite négative lorsque la variation des variables est inversée, c'est-à-dire que si une variable augmente, l'autre variable diminue. La taille des cercles est proportionnelle à la force de la relation entre deux variables : plus le cercle est gros et foncé, plus la corrélation entre deux variables est dite forte.

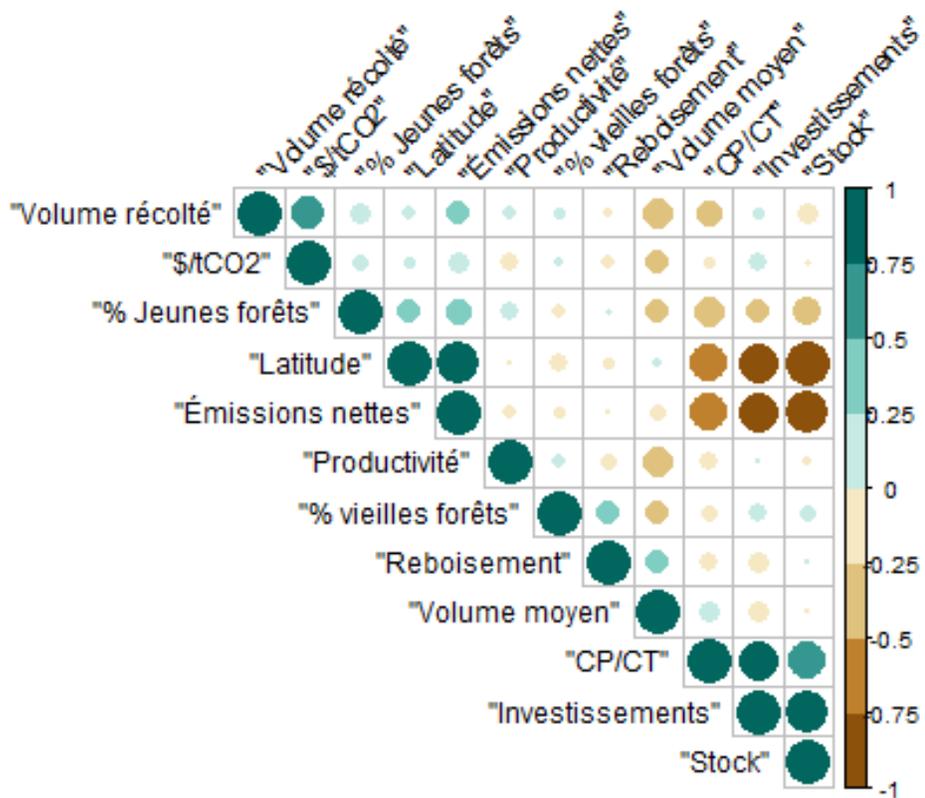


Figure 11. Corrélogramme des variables liées au carbone et à la forêt



Discussion

Le processus d'intégration des outils Woodstock, FMT et MGBC permet une estimation des stocks de carbone (tC/ha), de la productivité (tC/ha/an) et des échanges nets (tCO₂e/ha) dans le temps. Les données du calcul des possibilités forestières ont permis une extraction rapide des variables liées à l'aménagement forestier, rendant possible la comparaison entre les données sur le carbone et celles sur les décisions en aménagement.

De façon générale, les résultats des analyses suggèrent que la position géographique est la caractéristique qui distingue le plus les unités d'aménagement. Les forêts possèdent une productivité plus grande dans le sud de la province, ainsi qu'un aménagement forestier adapté à la composition et à la structure des peuplements qui s'y trouvent. Par conséquent, les forêts du sud présentent une capacité de séquestration plus grande et des stocks plus élevés. Concernant les latitudes plus nordiques, les résultats démontrent une capacité de séquestration moins grande. Lorsque comparées au sud de la province, les unités d'aménagement situées au nord emmagasinent des stocks moins grands à un rythme moins élevé. Il existe toutefois des exceptions lorsqu'il s'agit de comparer la variation de la productivité dans le temps. En effet, les unités d'aménagement 087-63 et 026-63, situées toutes les deux dans la région du Nord-du-Québec, ne présentent pas le même comportement de fluctuation de la productivité. L'unité d'aménagement 087-63 démontre une diminution de la productivité de 12 %, alors que l'unité d'aménagement 026-63, située à une latitude plus nordique, affiche un gain de productivité de 19 % sur l'ensemble de l'horizon. Dans ce cas précis, ce phénomène pourrait s'expliquer par la proportion de superficie destinée à l'aménagement et celle qui en est exclue. Ces deux unités d'aménagement sont caractérisées par des extrêmes en ce qui a trait à la superficie aménagée soit 80 % et 34 % pour la 087-63 et la 026-63 respectivement. En effet, les résultats semblent démontrer que les territoires aménagés avec une récolte fréquente diminueraient la productivité moyenne de l'écosystème, donc une moins grande production de photosynthèse en général. À l'opposé, les territoires non aménagés permettraient une augmentation et une stabilisation de leurs productivités moyennes. Bien évidemment, ces phénomènes sont intimement liés aux stratégies d'aménagement en place, à la structure d'âge initiale des catégories de superficies et aux hypothèses de croissance dans ces territoires.

La capacité des écosystèmes à séquestrer et à emmagasiner le carbone est fortement impactée par leur gradient géographique. En général, les superficies au sud de la province possèdent une meilleure capacité de séquestration et représentent des réservoirs plus grands de carbone.

Effet de l'optimisation des possibilités forestières sur les résultats de comptabilisation du carbone

Pour la majorité des unités d'aménagement analysées, une baisse des stocks est observée et varie de 0 à 12 % pour celles concernées avec une perte moyenne provinciale de 5 % sur l'ensemble de l'horizon. Toutefois, les unités d'aménagement 026-61 (3 %), 026-63 (4 %), 037-72 (1%), 086-63 (5 %) et 093-52 (2%) affichent une augmentation de leurs stocks (tC/ha). Ces territoires présentent de fortes proportions de superficies exclues de l'aménagement forestier, ce qui donne à penser que ce sont les superficies destinées à l'aménagement qui influencent le plus la baisse de la productivité de l'écosystème. Le fait de retirer du bois de l'écosystème par l'intermédiaire d'une récolte soutenue ou croissante résulte en un transfert des stocks de carbone vers les produits forestiers, mais engendre une

diminution de la capacité photosynthétique moyenne des superficies aménagées pour certaines unités d'aménagement. Les stratégies d'aménagement en place conjointement au niveau de récolte ne permettraient peut-être pas de maintenir un niveau optimal de productivité photosynthétique. De plus, la forêt des superficies exclues de l'aménagement n'étant pas perturbée par l'aménagement forestier, il n'y a donc pas d'émissions post-perturbation anthropique sur une part importante du territoire considéré comme étant des vieilles forêts. À titre de référence, l'unité d'aménagement 086-63 est constituée de 78 % de superficies exclues de l'aménagement et affiche le taux d'augmentation des stocks le plus élevé, soit 5 %. Cette augmentation globale de stock est toutefois possible grâce à la structure d'âge initiale de ce territoire dont une proportion importante est toujours à un stade intermédiaire de croissance.

Les résultats montrent aussi une variation marquée des échanges nets. Plus les échanges nets d'une unité d'aménagement sont positifs, plus elle est considérée comme une source de carbone. Dans le cas d'échanges nets négatifs, il s'agit d'un puits de carbone. L'unité d'aménagement 027-51 affiche la meilleure performance de séquestration, pour une amélioration de ses échanges nets de l'ordre de 1,73 tCO₂e/ha/an à la fin de l'horizon, ce qui est cohérent avec une productivité (tC/ha/an) en hausse. La séquestration de carbone n'étant pas linéaire, il se peut que les peuplements qui possèdent une meilleure performance de séquestration soient caractérisés par une structure d'âge précoce à mature. La croissance élevée permet alors un meilleur taux de séquestration de l'atmosphère vers l'écosystème. À l'inverse, de vieilles forêts, dont la séquestration est saturée, pourraient afficher une moins grande capacité de séquestration.

Puisque le taux de séquestration de CO₂e diminue dans le temps à l'intérieur de certaines unités d'aménagement, il est cohérent que leur productivité tende aussi à diminuer. Une distinction est importante entre les superficies destinées à l'aménagement et celles qui en sont exclues. La productivité des superficies destinées à l'aménagement diminue dans les régions de la Capitale-Nationale et de

Il est nécessaire de vérifier et de valider l'impact de l'optimisation par programmation linéaire sur la mesure de la capacité de séquestration du carbone, particulièrement dans le contexte des régions feuillues et pour un aménagement par coupes partielles.

l'Outaouais, alors que celle des superficies exclues de l'aménagement demeure constante. Les unités d'aménagement qui présentent une baisse de leur productivité possèdent une proportion plus grande de leur territoire (+ 75 %) qui est destinée à l'aménagement. La récolte résulte en un transfert des stocks sur pied de l'écosystème vers les produits forestiers. Ce retrait constant de stock sur pied résulte par le fait même en une diminution de la productivité photosynthétique pour les unités

d'aménagement concernées.

Les modèles Woodstock permettent une optimisation par programmation linéaire. Afin d'atteindre l'objectif de maximisation des possibilités forestières, l'optimisation tend à céder une récolte à un âge moyen et une composition des strates qui correspond au point culminant des courbes de croissance (ex. : accroissement annuel moyen le plus élevé), ce qui coïncide avec l'atteinte de la maturité des peuplements.

Une explication possible à la perte graduelle de productivité en carbone pourrait être liée à un rythme de récolte fréquent, dont le délai ne permet pas aux arbres sur pied de compenser la perturbation par coupe partielle. L'approche de comptabilisation actuelle ne permettrait peut-être pas de saisir l'impact de jeunes tiges en croissance puisqu'elle ramène toujours le peuplement à un âge intermédiaire,



considéré mature dans la comptabilisation du carbone. Ainsi, cette comptabilisation du carbone des forêts inéquiennes devrait être effectuée sur un état après coupe qui soit plus réaliste de ce qui se trouve sur le terrain. Enfin, la productivité en carbone implique la partie de volume non marchand des peuplements, alors que la productivité ligneuse générée par l'analyse des résultats du calcul des possibilités forestières tient compte du volume marchand seulement. Toutefois, la partie non marchand joue un rôle significatif dans la capacité de séquestration des peuplements et ceci pourrait constituer une opportunité d'amélioration pour la comptabilisation du carbone dans un régime de coupe partielle en forêts inéquiennes.

Pour le moment, la composition des peuplements des régions de l'Outaouais et de la Capitale-Nationale, et plus particulièrement, les traitements par coupes partielles qui caractérisent le type d'aménagement dominant sont deux facteurs soupçonnés de créer un décalage entre les intrants et les extrants de la comptabilisation du carbone. Ces pistes de réflexion soulèvent des questions sur des problèmes sous-jacents de modélisation des résultats Woodstock versus leur passage à MGBC, particulièrement en contexte de forêt inéquienne et seront à considérer dans de futures analyses. Il semble que cette limite n'avait pas encore été une préoccupation dans l'utilisation de MGBC au Canada. En effet, le modèle MGBC a d'abord été utilisé dans le contexte de la forêt de la Colombie-Britannique, principalement composée de superficies résineuses se caractérisant par une productivité stable, un aménagement équié et des échanges nets constants dans le temps. Bien que le modèle soit maintenant paramétré pour l'ensemble du Canada, une contextualisation de la comptabilisation pourrait être nécessaire, afin de mieux capter les particularités des forêts où les coupes partielles dominent.

Effet cumulatif des échanges nets

L'étude cumulative des échanges nets de CO₂e dans le temps permet de comparer la capacité des unités d'aménagement à jouer un rôle d'atténuation des changements climatiques. Celles qui possèdent la capacité de séquestration cumulative la plus grande sont toutes situées dans le sud de la province. La présente étude a permis de classer les unités d'aménagement selon un gradient de performance sur la base des scénarios de détermination. Plusieurs facteurs exercent toutefois une influence sur la performance des écosystèmes en termes de séquestration cumulative nette. Les hypothèses de productivité, les structures d'âges initiales, les modes de gestion du territoire, et les stratégies d'aménagement en place en sont quelques exemples. Bien que l'analyse en composantes principales ait permis d'identifier certaines tendances entre la foresterie et les métriques du carbone, il serait nécessaire de tester différents scénarios pour les territoires analysés afin de bien identifier les éléments stratégiques clés qui procurent une valeur ajoutée localement en termes d'échanges cumulatifs nets et donc de bénéfices climatiques.

Limites de l'approche

Il convient de soulever certaines limites au bilan du carbone forestier. Ces limites sont relatives aux approches d'analyse et de comptabilisation ainsi qu'à celles des logiciels.

L'approche d'analyse évalue les résultats provenant d'un seul scénario, soit celui ayant servi à la détermination des possibilités forestières 2023-2028. Bien qu'il soit possible d'évaluer des tendances entre les variables environnementales et forestières (latitude, volume, superficie, etc.) et les variables

reliées au carbone (stocks, productivité, échanges nets), il est nécessaire de comparer ces résultats avec ceux de scénarios alternatifs. Une comparaison permettrait de générer des résultats plus appropriés à l'identification de mesures d'atténuation.

En théorie, les principaux éléments qui influencent le comportement du carbone sont l'historique des perturbations, la structure d'âge initiale du peuplement, les hypothèses de croissance et la stratégie d'aménagement. L'approche de modélisation des possibilités forestières a été réalisée de manière déterministe, par optimisation et de manière à obtenir un calendrier d'interventions forestières sur un horizon de 150 ans. Les compilations des résultats sur le carbone ont été également réalisées sur cet horizon de temps. Il existe toutefois peu de connaissances sur l'évolution à si long terme des forêts tant dans les placettes-échantillons permanentes qui alimentent les modèles de croissance que dans les modèles de calcul eux-mêmes. L'approche utilisée n'intègre pas les perturbations naturelles futures ni les changements de croissance ou de composition futurs liés aux changements climatiques. Une prise en compte de ces phénomènes apporterait un éclairage sur les incertitudes entourant les résultats de la comptabilisation du carbone.

De plus, le modèle étudié n'intègre pas les produits forestiers ni leur pouvoir de substitution. Par conséquent, les effets d'atténuation cumulatifs ne sont pas complets.

Prochaines étapes

Les travaux permettent d'identifier certaines améliorations pour les travaux futurs et sur les mesures d'atténuation permettant d'utiliser la forêt comme outil de lutte contre les changements climatiques. La liste suivante dresse les principales suggestions :

1. Tester et comparer plusieurs scénarios pour différentes unités d'aménagement afin d'identifier les approches d'aménagement les plus favorables à la séquestration de CO₂.
2. Inclure les produits du bois après récolte dans les travaux afin de fournir une meilleure vue d'ensemble de la séquestration du carbone issu de la forêt, ainsi que des effets de substitution que représentent les produits du bois.
3. Développer une prise en compte des effets possibles des perturbations naturelles futures dans la comptabilisation du carbone.
4. Approfondir les résultats de comptabilisation du carbone dans le contexte de peuplements feuillus aménagés par coupes partielles pour expliquer les disparités constatées.
5. Utiliser un niveau de récolte constant pour la comptabilisation du carbone.



Conclusion

Les forêts publiques représentent un puits de carbone significatif et sont susceptibles d'être un outil puissant de lutte contre les changements climatiques. Au total, la quantité de stock emmagasiné dans les réservoirs des superficies forestières productives du Québec est estimée à près de 6 milliards de tC. C'est au sud que se trouvent les forêts les plus productives, ainsi que les plus grands réservoirs unitaires. Il est d'autant plus important de mieux comprendre la dynamique de la comptabilisation du carbone pour les forêts situées à des latitudes plus méridionales. Des travaux se poursuivent avec différents scénarios d'aménagement pour mieux comprendre ce qui influence le carbone, sa séquestration et son stockage.

De manière cumulative, l'ensemble des forêts aménagées participent à la séquestration du CO₂ atmosphérique. Avec le développement de stratégies visant une intensification de l'aménagement forestier, il convient de réfléchir aux meilleures approches d'aménagement qui puissent satisfaire les objectifs de production, mais aussi de la résilience des écosystèmes dans un contexte d'atténuation des changements climatiques. D'autres pistes de réflexion quant au carbone forestier et sa dynamique dans les forêts publiques québécoises seront à poursuivre dans les travaux futurs.

Références

- Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF), 2022. Les forêts : une force stabilisante pour le climat [en ligne]. Disponible à [Les forêts : une force stabilisante pour le climat - Conseil canadien des ministres des forêts \(CCMF\)](#) [Cité en juin 2022]
- Forêt Estrie. 2020. L'aménagement forestier, une solution naturelle aux changements climatiques [en ligne]. Disponible à [L'aménagement forestier, une solution naturelle aux changements climatiques - Forêt Estrie \(foret-estrie.ca\)](#) [Cité en août 2022]
- Gouvernement du Canada. 2022. Carbone forestier [en ligne]. Disponible à [Carbone forestier \(rncan.gc.ca\)](#) [Cité en août 2022]
- Ménard, I., Thiffault, E., Boulanger, Y. et Boucher, J.-F. (2022). *Multi-model approach to integrate climate change impact on carbon sequestration potentials of afforestation scenarios in Quebec, Canada*. *Ecological Modelling*, 473, 110-144
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. et Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Thibault, M., Thiffault, E., Bergeron, Y., Ouimet, R. et Tremblay, S. (2022). Afforestation of abandoned agricultural lands for carbon sequestration: how does it compare with natural succession? *Plant and Soil*, 1–17.
- Tremblay, S. et Ouimet, R. (2013). White spruce plantations on abandoned agricultural land: are they more effective as C sinks than natural succession ? *Forests*, 4(4), 1141–1157.



Annexe 1. Liste des unités d'aménagement

Tableau 5. Liste des unités d'aménagement selon leur région et l'année du dernier calcul des possibilités forestières

Régions	Unités d'aménagement	Année du dernier calcul
01	011-71	2018-2023
	012-72	2018-2023
02	023-71	2015-2018
	024-71	2023-2028
	025-71	2015-2018
	027-51	2015-2018
03	037-71	2023-2028
	037-72	2023-2028
04	026-51	2023-2028
	041-51	2018-2023
	042-51	2018-2023
	043-51	2018-2023
05	043-52	2018-2023
	051-51	2018-2023
07	071-51	2023-2028
	071-52	2023-2028
	072-51	2023-2028
	073-51	2023-2028
	073-52	2023-2028
	074-51	2023-2028
08	081-51	2015-2018
	081-52	2015-2018
	082-51	2018-2023
	083-51	2015-2018
	084-51	2018-2023
	084-62	2018-2023
	086-51	2018-2023
09	093-51	2023-2028
	093-52	2023-2028
	094-71	2023-2028
	095-51	2015-2018
	097-51	2023-2028
10	026-61	2023-2028
	026-62	2023-2028
	026-63	2023-2028
	026-64	2023-2028

Bilan provincial du carbone forestier

	026-65	2023-2028
	026-66	2023-2028
	085-51	2023-2028
	085-62	2018-2023
	086-52	2018-2023
	086-63	2023-2028
	086-64	2023-2028
	086-65	2023-2028
	086-66	2023-2028
	087-51	2018-2023
	087-62	2015-2018
	087-63	2015-2018
	087-64	2023-2028
11	111-61	2015-2018
	112-62	2015-2018
	112-63	2015-2018
12	034-51	2015-2018
	035-71	2018-2023
14	062-71	2018-2023
15	061-51	2018-2023
	064-71	2018-2023
	064-52	2015-2018



Annexe 2. Données par unité d'aménagement

Légende du tableau 6.

- ▶ BV : Biomasse aérienne et souterraine vivante (proportion)
- ▶ BM/Sol : Biomasse morte et carbone organique du sol (proportion)
- ▶ RTotal : Réservoir total (valeur absolue)

Tableau 6. Évolution des stocks de carbone par unité d'aménagement

Régions	UA	Période 2023-2028			Période 2083-2088			Période 2158-2163		
		BV	BM/Sol	RTotal	BV	BM/Sol	RTotal	BV	BM/Sol	RTotal
		%	%	tC/ha	%	%	tC/ha	%	%	tC/ha
R02	024-71	22	78	162	21	79	152	22	78	155
	027-51	19	81	166	23	77	164	21	79	163
R03	037-71	29	71	265	26	74	253	25	75	246
	037-72	27	73	203	29	72	211	27	73	203
R04	026-51	23	77	172	21	79	159	23	77	159
R07	071-51	34	65	323	31	69	316	29	71	299
	071-52	32	68	314	29	71	304	27	73	289
	072-51	35	66	335	33	67	335	31	69	319
	073-51	32	68	332	28	71	319	27	73	298
	073-52	29	70	278	28	72	271	26	74	265
	074-51	29	71	277	25	76	254	23	77	243
R09	093-51	24	76	178	25	75	175	24	76	172
	093-52	26	74	147	26	75	147	26	74	149
	094-71	25	75	175	22	78	160	22	78	155
	097-51	21	79	185	25	75	188	24	76	185
R10	026-61	18	81	133	22	78	138	22	78	136
	026-62	19	81	147	21	79	149	20	80	143
	026-63	24	76	140	26	74	147	24	76	146

Bilan provincial du carbone forestier

	026-64	21	79	154	21	78	150	21	79	144
	026-65	22	78	142	23	78	139	21	76	135
	026-66	21	79	153	20	80	147	21	79	143
	085-51	21	79	156	22	78	153	22	78	149
	086-83	25	75	117	26	74	124	24	76	123
	086-64	23	77	160	19	81	145	21	79	144
	086-65	22	78	171	19	81	155	21	79	154
	086-66	20	81	144	21	79	140	23	77	143
	087-62	19	81	159	21	79	151	21	79	146
	087-63	22	78	187	22	78	179	21	79	169
	087-64	20	74	161	20	80	153	20	80	147
Moyenne pondérée		24%	76%	188	24%	76%	182	24%	76%	178

Tableau 7. Évolution de la productivité de carbone par type de superficie et par unité d'aménagement

Régions forestières	UA	Période 2023-2028			Période 2083-2088			Période 2158-2163		
		Incluse	Exclue	Total	Incluse	Exclue	Total	Incluse	Exclue	Total
		tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha	tC/ha
R02	024-71	2,14	2,12	2,14	2,41	2,19	2,38	2,46	2,07	2,40
	027-51	2,17	1,90	2,15	2,81	2,27	2,77	2,62	2,10	2,58
R03	037-71	4,49	5,34	4,57	4,07	5,31	4,19	3,75	5,07	3,88
	037-72	3,37	3,83	3,47	3,19	3,84	3,33	3,04	3,65	3,17
R04	026-51	2,26	2,78	2,28	2,49	2,46	2,49	2,47	2,16	2,46
R07	071-51	6,20	5,84	6,17	5,47	6,11	5,52	4,87	5,88	4,95
	071-52	5,63	6,09	5,66	5,07	6,26	5,14	4,74	6,04	4,82
	072-51	6,59	5,58	6,34	5,61	5,96	5,69	4,95	5,81	5,16
	073-51	6,11	6,36	6,12	5,33	6,41	5,38	4,86	6,19	4,92
	073-52	4,75	5,66	4,92	4,21	5,57	4,45	4,06	5,35	4,29
	074-51	4,88	5,56	4,90	4,07	5,41	4,11	3,89	5,21	3,93



Bilan provincial du carbone forestier

R09	093-51	2,34	2,61	2,36	2,57	2,77	2,58	2,52	2,67	2,53
	093-52	1,88	2,01	1,93	1,87	2,17	1,99	1,91	2,14	2,00
	094-71	2,09	2,22	2,11	2,11	2,27	2,14	2,00	2,12	2,02
	097-51	2,75	3,33	2,81	2,97	3,36	3,01	2,88	3,15	2,91
R10	026-61	1,80	1,86	1,81	2,12	2,01	2,11	2,16	1,92	2,14
	026-62	1,89	1,96	1,89	2,36	2,03	2,33	2,18	1,94	2,16
	026-63	1,88	2,17	1,90	2,21	2,16	2,21	2,28	1,96	2,26
	026-64	2,19	2,46	2,20	2,28	2,26	2,28	2,29	2,02	2,28
	026-65	1,98	2,32	2,00	2,21	2,28	2,21	2,23	2,04	2,22
	026-66	2,23	2,68	2,25	2,22	2,59	2,23	2,23	2,24	2,23
	085-51	2,41	2,18	2,36	2,34	2,18	2,31	2,27	1,97	2,21
	086-83	1,52	1,66	1,59	1,71	2,00	1,87	1,37	1,90	1,65
	086-64	2,21	2,31	2,23	2,04	2,18	2,08	2,26	1,94	2,18
	086-65	2,40	2,48	2,41	2,25	2,26	2,25	2,39	2,03	2,36
	086-66	1,98	1,93	1,97	2,00	2,19	2,05	2,24	2,02	2,19
	087-62	2,16	2,51	2,18	2,36	2,46	2,37	2,29	2,14	2,28
	087-63	2,77	3,24	2,84	2,62	2,92	2,66	2,52	2,42	2,50
	087-64	2,28	2,63	2,29	2,28	2,46	2,29	2,31	2,17	2,31
Moyenne pondérée		2,8	3,0	2,8	2,8	3,0	2,8	2,7	2,9	2,7

