



LA FORÊT MONTMORENCY

ET LA CARBONEUTRALITÉ
DE L'UNIVERSITÉ LAVAL



UNIVERSITÉ
LAVAL

LA FORÊT MONTMORENCY

La Forêt Montmorency est la forêt d'enseignement et de recherche de l'Université Laval. Constitué en 1964, avec une superficie initiale de 66 km², le territoire forestier sous la responsabilité de l'Université Laval fut agrandi en 2014. Ainsi, la superficie totale de la Forêt Montmorency atteint maintenant 397 km². Le territoire original de la Forêt Montmorency est appelé secteur A; la portion agrandie correspond au secteur B (Figure 1).

Plus grande forêt universitaire d'enseignement et de recherche au monde, ce laboratoire à ciel ouvert permet à des chercheurs de s'adonner à différents travaux de recherche. Des étudiants y apprennent aussi les bonnes pratiques en matière de sylviculture, d'aménagement et d'opérations forestières.

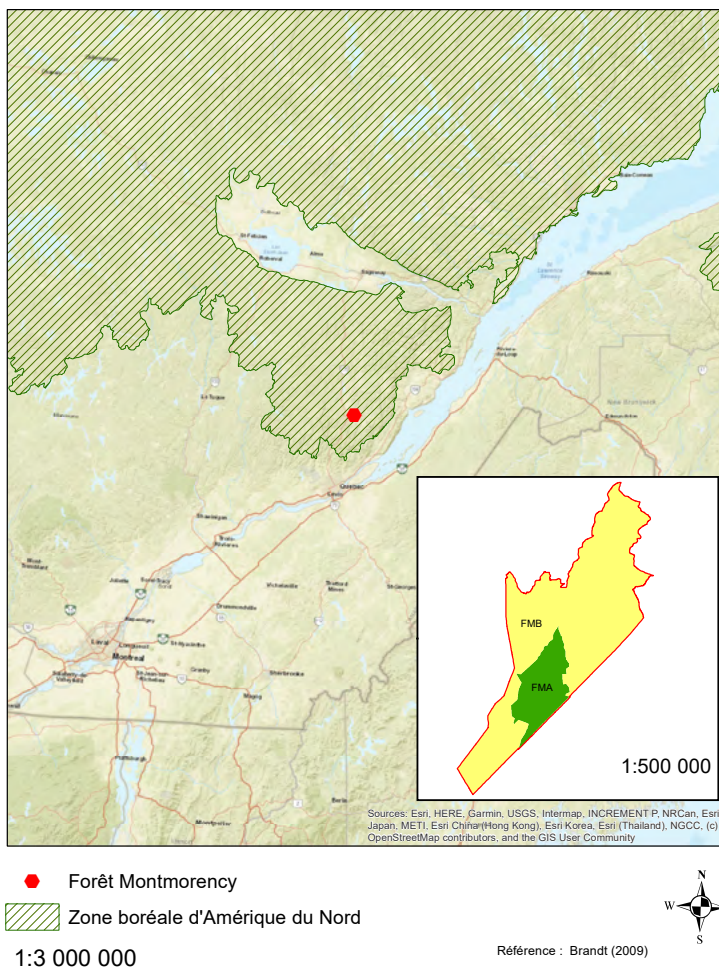


Figure 1. Territoire de la Forêt Montmorency

CONTEXTE

La Forêt Montmorency est située à 75 km au nord de Québec. Elle est bordée par la Réserve faunique des Laurentides, la Seigneurie de Beaupré et le Parc national de la Jacques-Cartier. Cette forêt se trouve dans le sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'Est, qui se caractérise par un climat froid (température annuelle moyenne de 0 °C) et humide (avec plus de 1 200 mm de précipitations par année) (Grondin et al., 1998). Généralement, en forêt boréale, la perturbation naturelle majeure est le feu. Cependant, à la Forêt Montmorency, en raison de son climat, les incendies se font rares; les perturbations naturelles dominantes sont les épidémies d'insectes, particulièrement la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana Clem.*), et le chablis (Leblanc et Bélanger, 2000).

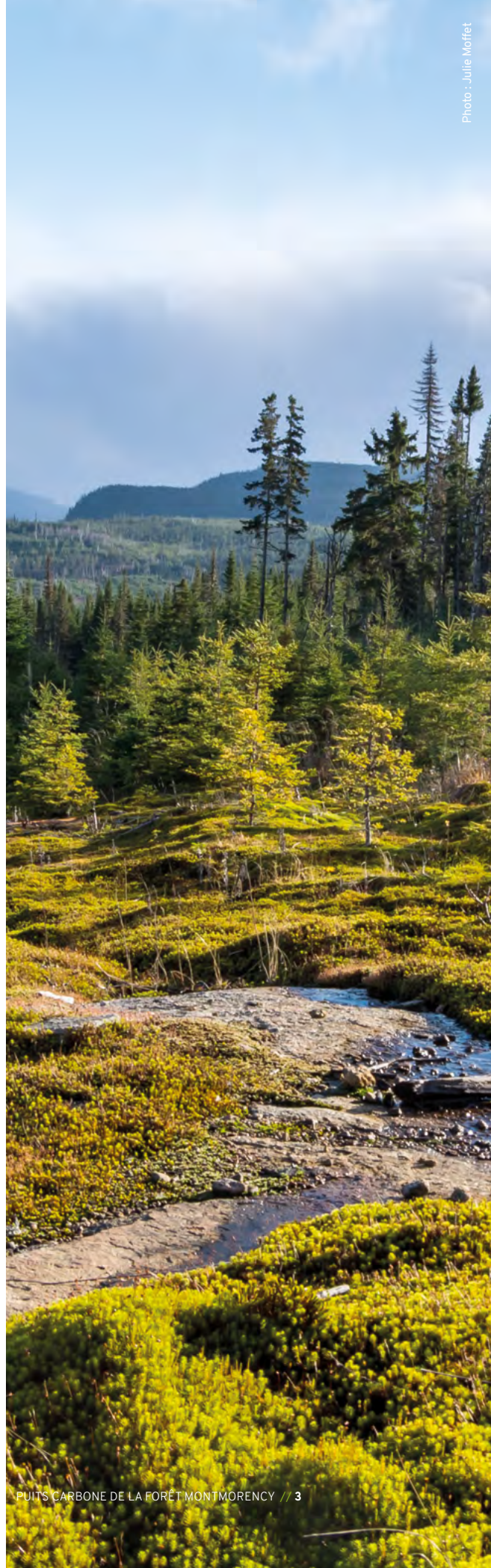
MISSION

La mission de la Forêt Montmorency est :

- > d'être un milieu d'accueil pour l'enseignement, la recherche et l'éducation du grand public en lien avec l'aménagement forestier durable;
- > de viser, par l'expérimentation, l'excellence et l'exemplarité pour l'avancement des sciences en lien avec le territoire forestier.

L'Université Laval aménage le territoire de la Forêt Montmorency selon les principes d'aménagement forestier durable, en visant notamment l'utilisation polyvalente du territoire. La Politique d'aménagement durable de la Forêt Montmorency a été développée selon cinq axes :

- > Recherche et amélioration continue
- > Conservation du milieu et des ressources forestières
- > Mise en valeur du territoire et des ressources forestières
- > Enseignement et formation continue
- > Éducation populaire et appui au milieu



RECHERCHE ET AMÉNAGEMENT

Les orientations d'aménagement de la Forêt Montmorency sont élaborées par le Comité scientifique et d'aménagement. Ce comité consultatif est présidé par Évelyne Thiffault, professeure à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, et membre du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables.

Au total, ce comité regroupe des professeurs, des étudiants de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, des chercheurs gouvernementaux ainsi que des représentants des parties prenantes du territoire de la Forêt Montmorency (par exemple, les communautés autochtones, les groupes environnementaux, les compagnies forestières, etc.).

Depuis son agrandissement, la Forêt Montmorency a servi de lieu d'étude du carbone forestier et du rôle de la foresterie dans la lutte contre les changements climatiques, dans la lignée des constats et des recommandations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Encadré 1).



ENCADRÉ 1

LE GIEC, LA FORESTERIE ET LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui relève du Programme des Nations Unies pour l'environnement et de l'Organisation météorologique mondiale, reconnaît que les solutions liées à l'utilisation des terres, notamment la foresterie, peuvent jouer un rôle clé en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le GIEC énumère différentes approches de foresterie considérées comme efficaces pour la lutte contre les changements climatiques (Figure 2), dont :

- > le boisement et le reboisement (augmentation des superficies forestières) et la diminution du déboisement (réduction de la perte de superficies forestières);
- > l'aménagement durable des forêts;
- > la production et l'utilisation de matériaux et d'énergie issus de la récolte forestière en réponse aux besoins des sociétés qui permettent de remplacer des produits d'origine fossile.

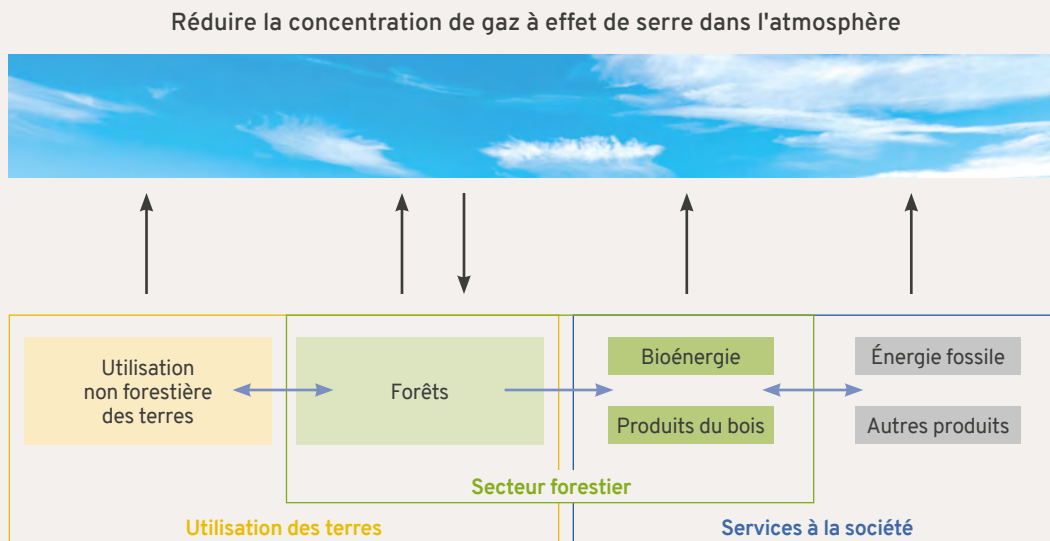


Figure 2. Rôle de la foresterie dans la lutte contre les changements climatiques (adapté de : Nabuurs et al., 2007)

Références :

IPCC. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York, USA, 2014.

Nabuurs, G.J.; Masera, O.; Andrasko, K.; Benitez-Ponce, P.; Boer, R.; Dutschke, M.; Elsiddig, E.; Ford-Robertson, J.; Frumhoff, P.; Karjalainen, T., et al. Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., Meys, L.A., Eds. Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

FONCTIONNEMENT D'UN PUIITS DE CARBONE

Un puits de carbone est un réservoir naturel ou artificiel qui absorbe le carbone de l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO₂) et le stocke, contribuant ainsi à diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique. On dit d'un écosystème forestier qu'il est un puits de carbone lorsque la quantité de CO₂ séquestrée par le processus de photosynthèse est plus grande que la quantité de CO₂ perdu vers l'atmosphère par la respiration autotrophe (celle des végétaux) et hétérotrophe (celle des autres organismes de l'écosystème, incluant les micro-organismes responsables de la décomposition de la matière organique). À l'inverse, on dira qu'il est une source de carbone quand les émissions vers l'atmosphère sont plus élevées que la séquestration. Le bilan carbone d'un écosystème ou d'un paysage forestier va varier dans le temps selon l'âge et l'état de santé des arbres, les conditions climatiques et les perturbations qui surviennent.

Par exemple, les forêts aménagées du Canada sont une source de CO₂ depuis quelques années en raison d'[importants feux de forêt](#). Aussi, une forêt frappée par la tordeuse des bourgeons de l'épinette (un insecte qui s'attaque aux conifères et qui crée des épidémies dans les forêts boréales de l'est du Canada tous les 30-40 ans) va être une source de carbone pendant quelques années : les arbres défoliés ne feront plus de photosynthèse, et commenceront à pourrir et à se décomposer.

Cela dit, certaines pratiques peuvent permettre d'augmenter le puits de carbone. Par exemple, planter des arbres sur des sites non forestiers (ex. : anciennes gravières, sites anthropisés) permet d'augmenter les superficies forestières qui stockeront du carbone dans la biomasse végétale et les sols. Favoriser la croissance des peuplements forestiers et minimiser les perturbations contribuent également à augmenter la séquestration de CO₂ et à réduire les émissions.

On peut aussi récolter les arbres pour en faire des produits du bois. La transformation du bois en produits solides de longue durée, pour la construction par exemple, permet de poursuivre le stockage d'une partie du carbone des arbres à l'intérieur de ces produits jusqu'à leur fin de vie.



En outre, la récolte, la transformation et l'utilisation du bois produisent moins d'émissions et nécessitent moins d'énergie issue des combustibles fossiles que la fabrication et l'utilisation d'autres matériaux non renouvelables comme l'acier et le ciment. Par ailleurs, les résidus venant de la récolte des arbres, de la fabrication de produits du bois et des déchets post-consommation peuvent être valorisés en bioénergie, en remplacement d'énergie d'origine fossile.

Lorsque l'on met en œuvre des actions supplémentaires qui permettent d'augmenter le puits de carbone d'un territoire (c.-à-d. augmenter la séquestration du carbone dans les écosystèmes, favoriser le stockage à long terme du carbone dans les écosystèmes et les produits du bois), cela permet une atténuation des émissions de GES par rapport à la situation actuelle.

L'additionnalité de ces actions est importante : pour avoir un effet réel d'atténuation, ces actions doivent aller au-delà du cours normal des affaires, c'est-à-dire au-delà de ce qui se fait dans la pratique courante ou de ce qui est requis par les lois et la réglementation. Par exemple, au Québec, la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier requiert que les exploitants forestiers, qui effectuent de la récolte de bois, assurent le renouvellement des forêts récoltées et fixent un seuil minimal à respecter quant à la présence de semis d'arbres sur les parterres de coupe. Les actions visant à reboiser les sites récoltés pour atteindre ce seuil ne sont pas considérées comme additionnelles, car elles sont exigées par la loi et servent à maintenir le capital forestier actuel; on ne peut donc pas les considérer comme des mesures servant à augmenter le puits de carbone.

Nous devons faire mieux que la situation actuelle. Ainsi, **seules les actions additionnelles au cours normal des affaires contribuent à augmenter le puits de carbone et sont considérées comme des mesures d'atténuation des émissions de GES.**

DE PUICTS DE CARBONE À CRÉDITS COMPENSATOIRES

Le marché du carbone est un mécanisme visant à faciliter l'atteinte de cibles d'atténuation des changements climatiques, et ce, de manière rentable : il permet de maximiser les efforts d'atténuation dans les secteurs où les investissements sont les plus faibles (Van der Gaast et al., 2018). Il existe deux marchés du carbone complémentaires : le marché contraignant ou réglementaire et le marché volontaire. Un peu partout dans le monde, des projets de crédits carbone forestiers sont développés pour l'un ou l'autre de ces marchés. Dans la plupart des cas, ces crédits doivent répondre à des protocoles de quantification du carbone et à des normes de certification (par exemple, les protocoles et normes de Verified Carbon Standard ou de Gold Standard dans le cas du marché volontaire). Les crédits ainsi reconnus et certifiés peuvent ensuite être vendus sur le marché du carbone.

Dans le cas de la Forêt Montmorency, le puits de carbone ne fait pas l'objet d'une reconnaissance officielle par un protocole de certification puisque les tonnes d'équivalent CO₂ séquestrées ne sont pas vendues sur les marchés. La démarche de l'Université Laval vise davantage à stimuler la recherche et l'innovation, et à faire avancer les connaissances scientifiques sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers et la modélisation du cycle du carbone. Les travaux de quantification du puits de carbone de la Forêt Montmorency sont effectués par une équipe scientifique indépendante de l'administration de l'Université Laval, ce qui assure le respect d'un processus rigoureux. Ces travaux s'inspirent des normes de certification, mais ne visent pas à les reproduire ou à s'y substituer.

RÔLE DE LA FORÊT MONTMORENCY DANS LA CARBONEUTRALITÉ DE L'UNIVERSITÉ LAVAL

Afin de respecter ses engagements de carboneutralité, l'Université Laval compte entre autres sur le puits de carbone de la Forêt Montmorency pour compenser ses émissions de GES de catégories 1 et 2¹ (chauffage des bâtiments, flotte de véhicules, fuites d'halocarbures, électricité). Il est à noter que ses émissions font l'objet d'une stratégie de réduction détaillée dans le plan d'action en énergie 2020-2025.

Les pratiques d'aménagement mises en place à la Forêt Montmorency ont notamment pour objectif de maximiser son potentiel de séquestration de carbone et de stockage dans les écosystèmes et les produits du bois de longue durée.

Le territoire de la Forêt Montmorency arrive ainsi à capter et à stocker des quantités de CO₂ plus importantes que la moyenne des forêts semblables qui sont régies par le cours normal des affaires (pratiques courantes et réglementation en vigueur). Ce sont uniquement ces quantités de carbone supplémentaires, issues de pratiques spécifiques additionnelles par rapport au cours normal des affaires, qui sont comptabilisées par l'Université Laval pour quantifier le puits de carbone de la Forêt Montmorency, et qui lui permettent de compenser ses émissions de CO₂.

Afin d'accroître le potentiel de son puits de carbone, la Forêt Montmorency doit donc s'assurer de maintenir des pratiques d'aménagement et de production du bois novatrices et basées sur les avancées scientifiques les plus récentes en matière de gestion du carbone forestier. L'Université Laval espère aussi que les pratiques mises en œuvre à la Forêt Montmorency servent d'exemple pour les autres territoires forestiers au Québec et ailleurs dans le biome boréal, et ainsi contribuer aux efforts mondiaux de lutte contre les changements climatiques. C'est pourquoi ses chercheurs diffusent leurs travaux scientifiques sur le carbone forestier², et accompagnent les décideurs et les communautés pour aider à implanter les meilleures pratiques possible.

Il est important de souligner que d'autres considérations, outre la gestion du puits de carbone, guident les pratiques de la Forêt Montmorency, et ce, en accord avec sa politique d'aménagement durable; on pense notamment à la conservation de la biodiversité et des valeurs culturelles et sociales des paysages forestiers.

¹ Les émissions de catégories 1 et 2 sont le résultat d'activités dont l'Université est directement ou indirectement responsable. Puisqu'elle a l'entière responsabilité du choix des méthodes et des outils utilisés pour ces activités, leurs émissions de GES associées lui sont imputables. Ce sont ces émissions nettes que l'Université doit rendre nulles pour atteindre et maintenir la carboneutralité du campus.

² « Le secteur forestier et la lutte aux changements climatiques », présentation d'Evelyne Thiffault, 8 février 2021, <https://www.youtube.com/watch?v=6OFLo7NblYg>
« Quel rôle pour le secteur forestier québécois dans la lutte aux changements climatiques? », présentation de Lucas Moreau, 17 mai 2021, https://www.youtube.com/watch?v=Zky_VHcg_qM

QUANTIFICATION DU PUIITS DE CARBONE DE LA FORÊT MONTMORENCY

Depuis 2014, en s'appuyant sur les travaux de recherche menés à la Forêt Montmorency, l'Université Laval applique les meilleures pratiques pour augmenter le puits de carbone du territoire. La quantité de carbone additionnelle (exprimée en tonnes d'équivalent CO₂) séquestrée par le puits de carbone de la Forêt Montmorency correspond à une moyenne annuelle calculée pour un horizon de 60 ans. Cet horizon de temps a été choisi, car il représente la longueur approximative d'une révolution de coupe dans la sapinière boréale (c.-à-d. la période entre deux récoltes pour un peuplement forestier donné), suivant ainsi la méthodologie utilisée par les protocoles de crédits carbone forestiers. Ce calcul est actualisé tous les 5 ans.

PÉRIODE 2014-2018

Le premier calcul du puits de carbone de la Forêt Montmorency visait la période 2014-2018. À la demande du vice-recteur exécutif et au développement de l'Université, un premier comité d'experts, présidé par le doyen de la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, avait été formé pour amorcer la démarche de l'Université. De manière sommaire, la méthode utilisée reposait sur le constat que les pratiques d'aménagement forestier telles qu'exercées sur le territoire original de la Forêt Montmorency (secteur A), et qui seraient appliquées sur le nouveau territoire agrandi (secteur B), permettent une meilleure productivité forestière (c.-à-d. que les peuplements forestiers produisent en moyenne une quantité plus élevée de bois par unité de surface) que celles généralement appliquées en forêt québécoise (le cours normal des affaires).

Afin que l'on puisse valider ce constat, la cartographie de la biomasse des forêts canadiennes a été utilisée. Cette cartographie, développée par le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada, représente la masse végétale aérienne présente dans les peuplements forestiers, incluant le bois et l'écorce des troncs, les branches des arbres, ainsi que leur feuillage (Beaudoin et al., 2014). La quantité de biomasse moyenne présente dans le secteur A de la Forêt Montmorency a été comparée avec la quantité moyenne retrouvée sur les territoires voisins exploités selon le cours normal des affaires. Cette comparaison a démontré que les pratiques d'aménagement de l'Université Laval, utilisées depuis les années 1960, ont résulté en une plus grande quantité de biomasse par unité de surface que les pratiques régulières appliquées sur les territoires avoisinants. La différence de biomasse a été estimée à 16,5 tonnes métriques anhydres de biomasse végétale par hectare (tma ha⁻¹). Cette biomasse supplémentaire trouvée sur le territoire du secteur A suggère ainsi que les pratiques d'aménagement de la Forêt Montmorency permettent de séquestrer et de stocker plus de carbone (du moins dans la biomasse végétale aérienne) dans les écosystèmes forestiers que le cours normal des affaires.

On peut traduire cette biomasse supplémentaire en unités de tonnes d'équivalent CO₂ de la manière suivante :

- > 1 tonne métrique anhydre de biomasse végétale équivaut à 0,5 tonne de carbone (la masse du vivant est généralement formée à 50 % de carbone [Penman et al., 2003])
- > 1 tonne de carbone équivaut à 3,67 tonnes d'équivalent CO₂ (ce facteur est calculé à partir de la masse molaire du carbone [C] par rapport à la masse molaire du CO₂)
- > Donc : 16.5 tma ha⁻¹ = 30.25 tonnes d'équivalent CO₂ ha⁻¹

À partir de ces constats, le comité a estimé l'effet qu'aurait l'application des pratiques d'aménagement de l'Université sur les 331 km² du nouveau territoire de la Forêt Montmorency (secteur B), qui jusqu'alors était soumis au cours normal des affaires. Ainsi, en présumant que l'application des pratiques d'aménagement de l'Université Laval sur ce nouveau territoire permettrait d'augmenter la séquestration et le stockage de carbone dans les écosystèmes forestiers, le comité a estimé la séquestration annuelle additionnelle pouvant servir à compenser les émissions de l'Université Laval à 13 945 tonnes d'équivalent CO₂.

Cette donnée est en fait une moyenne annuelle calculée dans l'optique selon laquelle les pratiques de l'Université Laval sont appliquées sur l'ensemble du secteur B sur un horizon de temps de 60 ans (cette valeur correspondant à la longueur d'une révolution de coupe dans la sapinière boréale, c'est-à-dire la période entre deux récoltes d'un même peuplement). Cette estimation a tenu compte du fait que les conditions de croissance des arbres du secteur B sont un peu moins favorables que celles du secteur A, en raison d'une altitude moyenne plus élevée et d'une température moyenne annuelle plus faible, ce qui pourrait réduire le potentiel de séquestration du carbone par la végétation.

C'est donc cette valeur de 13 945 tonnes d'équivalent CO₂ par année qui a été utilisée pour la période 2014-2018 dans les calculs de carboneutralité de l'Université Laval.



PÉRIODE 2018-2023

Pour la période 2018-2023, la quantification du puits de carbone de la Forêt Montmorency se base sur :

- > les travaux de recherche terrain permettant de mieux comprendre la dynamique du carbone forestier propre à la sapinière boréale de la Forêt Montmorency et d'établir les pratiques d'aménagement permettant d'améliorer la séquestration du carbone en forêt et le stockage dans les écosystèmes et les produits du bois (Encadré 2);
- > la modélisation du cycle du carbone en forêt et dans les produits du bois (Encadré 3).

Ces travaux s'inscrivent dans une programmation de recherche plus large visant le développement des connaissances sur le potentiel d'atténuation des changements climatiques du secteur forestier québécois et des forêts boréales mondiales.

Le périmètre comptable utilisé pour évaluer la valeur du puits de carbone de la Forêt Montmorency est calqué sur celui utilisé par le gouvernement du Canada pour rapporter les émissions de ses terres forestières à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques dans son Rapport d'inventaire national (secteur Affectation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie). Ainsi, il inclut le bilan carbone net combiné des écosystèmes forestiers et des produits issus de l'exploitation forestière et de la transformation du bois du territoire (Figure 3).

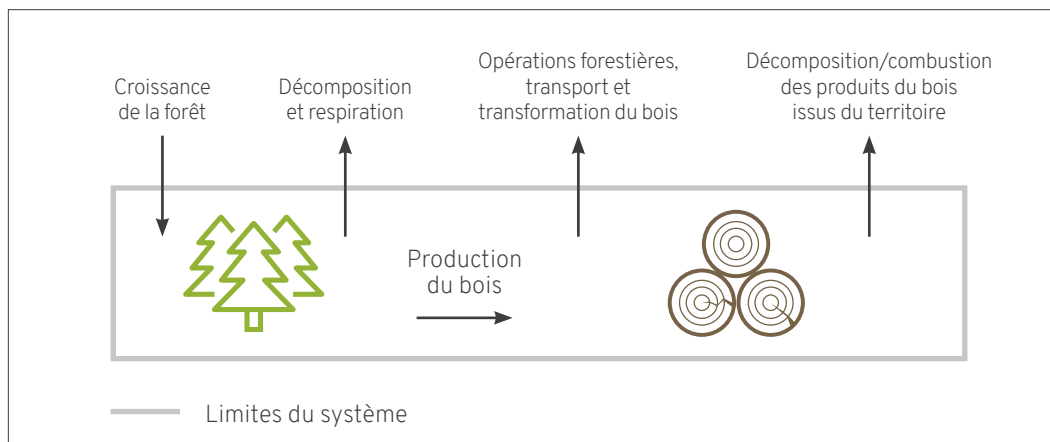


Figure 3. Périmètre comptable utilisé pour calculer le puits de carbone de la Forêt Montmorency

Dans le contexte de travaux de recherche, il arrive que l'effet de l'utilisation des produits du bois sur les marchés soit estimé, en réponse aux besoins des sociétés, et en substitution de matériaux et d'énergie d'origine fossile ou à forte intensité de GES (voir par exemple Beauregard et al., 2019 et Paradis et al., 2019). Toutefois, l'effet de substitution n'est pas considéré dans le périmètre comptable du puits de carbone de la Forêt Montmorency.

Les calculs actualisés ont ainsi permis d'estimer la séquestration à 14 413 tonnes d'équivalent CO₂ annuellement. C'est cette valeur de puits de carbone qui est utilisée pour la période 2018-2023 dans les calculs de carboneutralité de l'Université Laval. Voir l'Encadré 4 pour les détails techniques du calcul.

ENCADRÉ 2

SUIVRE À LA TRACE LE CARBONE FORESTIER

Des travaux terrain à la Forêt Montmorency ont permis de quantifier les réservoirs de carbone forestier et leur réponse face aux pratiques d'aménagement forestier. Par exemple, la Figure 4 présente l'évolution du carbone dans les différents compartiments de l'écosystème forestier après la coupe totale d'un hectare de forêt de sapin baumier et de bouleau blanc typique de la Forêt Montmorency. Cette courbe a été établie grâce au mesurage de plusieurs dizaines de peuplements de différents âges.

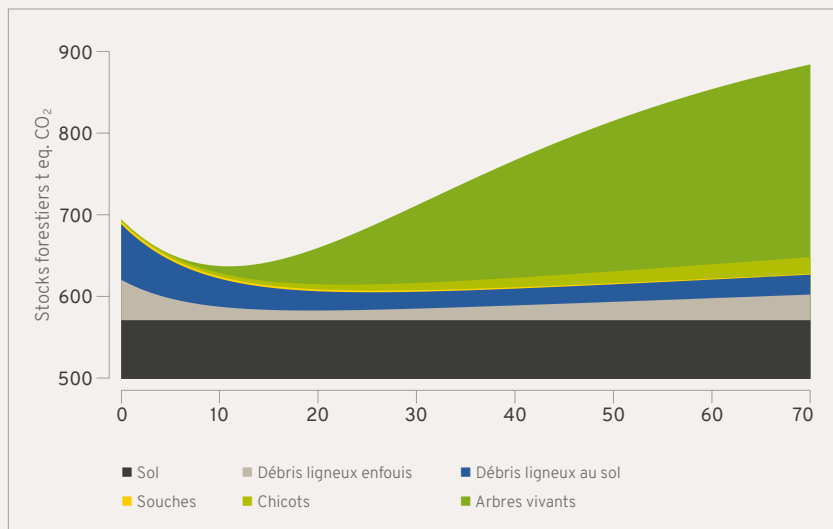


Figure 4. Évolution des stocks de carbone en forêt après la coupe de 1 hectare de sapinière à bouleau blanc

Il est possible de constater que dans les premières années suivant la coupe, les stocks de carbone dans les débris diminuent rapidement en raison de la décomposition accélérée par l'enlèvement du couvert forestier. La croissance des arbres vivants commence lentement, puis s'accélère après quelques années, quand les semis régénérés sur le parterre de coupe deviennent suffisamment grands et vigoureux pour permettre une accumulation significative de carbone grâce à la photosynthèse. Ainsi, au total, les stocks de carbone diminuent pendant quelques années après la coupe, puis augmentent rapidement lorsque la croissance des arbres devient importante.

En d'autres mots, au cours des premières années suivant la coupe (13 ans), la forêt est une source de carbone en raison de la décomposition. Après quelques années (26 ans), la croissance des arbres devient suffisamment importante, de sorte que la forêt réussit à recapter les émissions précédentes dues à la décomposition et à devenir un puits net de carbone. De bonnes pratiques de sylviculture peuvent nous permettre i) d'augmenter la séquestration de carbone (en favorisant la croissance des arbres) et ii) de réduire les émissions à l'atmosphère (en réduisant la perturbation du sol et du couvert forestier).





Or, les flux de carbone en forêt ne représentent qu'une partie des effets du secteur forestier : il faut considérer également les produits du bois issus de la coupe. En effet, le carbone contenu dans le bois récolté en forêt est transféré en partie dans des produits. Le carbone contenu dans les produits est stocké à plus ou moins long terme, selon la durée de vie du produit fabriqué. La durée de vie des matériaux issus du sciage du bois (ex. : les matériaux de construction) peut être de plusieurs décennies; cela signifie que le carbone qu'ils contiennent est stocké sur une plus longue période. Il est possible d'augmenter la proportion de bois de sciage grâce à i) des pratiques de récolte et de sylviculture qui augmentent la qualité et la grosseur des tiges récoltées et ii) des améliorations en usine.

Il est aussi nécessaire de comptabiliser les émissions liées aux opérations forestières, au transport et à la transformation du bois. Ici aussi, des pistes sont possibles pour réduire ces émissions, et font l'objet de travaux de recherche tant à l'Université Laval que dans d'autres organisations.

Grâce à ces informations, il est possible de simuler et de comparer différentes stratégies d'aménagement pour déterminer celles qui permettent d'augmenter le puits de carbone. Des travaux de recherche ont ainsi suggéré que les pratiques suivantes conviennent bien au contexte de la sapinière boréale de la Forêt Montmorency :

- > favoriser une régénération abondante, vigoureuse et bien établie après la coupe;
- > allonger la longueur de la révolution de coupe;
- > utiliser la coupe partielle (qui permet le maintien d'une partie du couvert forestier et minimise les émissions liées à la récolte) en remplacement de la coupe totale;
- > protéger les vieilles sapinières, qui sont des réservoirs importants de carbone, et augmenter leur proportion.

Références :

Paradis, L., Thiffault, E., and Achim, A. 2019. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research*: cpz004. doi:10.1093/forestry/cpz004.

Senez-Gagnon, F., Thiffault, E., Paré, D., Achim, A., and Bergeron, Y. 2018. Dynamics of detrital carbon pools following harvesting of a humid eastern Canadian balsam fir boreal forest. *Forest Ecology and Management* 430: 33-42.

Harel, A., Thiffault, E. et Paré, D. 2021. Ageing forests and carbon storage: a case study in boreal balsam fir stands, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2021; cpab021, <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab021>

Sage, L.K., Smith, C.T., Kurz, W., Thiffault, E., Paré, D. and Bernier, P. 2019 Empirical and predicted boreal forest carbon pools following stem-only harvesting in Quebec, Canada. *Soil Science Society of America Journal*, 83, S59-S81.

Vanessa Audet-Giroux. La séquestration du carbone dans les écosystèmes de la forêt boréale selon les traitements sylvicoles. Mémoire de maîtrise en sciences forestières sous la direction de Evelyne Thiffault et co-direction de Alison Munson. Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval. À paraître.

DES MODÈLES POUR REPRÉSENTER LE CYCLE DU CARBONE FORESTIER

Le [Modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien](#) (en anglais : Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector) est un outil de comptabilisation des stocks et des flux de carbone des écosystèmes forestiers, développé par le Service canadien des forêts. Il est conforme aux recommandations du GIEC, et est utilisé par le Canada dans ses rapports d'inventaires nationaux de gaz à effet de serre produits pour la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

La version la plus récente de ce modèle, appelée Generic Carbon Budget Model (GCBM), permet une analyse spatialement explicite de la dynamique des flux de carbone; cette nouvelle version est accessible sur la plateforme ouverte [Full Lands Integration Tool](#) (FLINT), développée et maintenue par moja global. Cette nouvelle version est utilisée au Québec par le Bureau du Forestier en chef pour comptabiliser l'effet des stratégies d'aménagement forestier sur les flux de carbone de la forêt publique québécoise.

Dans ce modèle, l'écosystème forestier est divisé en différents réservoirs : les arbres, le sol, les débris ligneux et autres réservoirs de matière organique morte. Les stocks de carbone des réservoirs, ainsi que les flux entre les réservoirs et les échanges avec l'atmosphère, sont simulés.

La production de biomasse vivante par les arbres est dictée par des courbes de croissance. La croissance des arbres et les perturbations d'origine naturelle ou humaine engendrent des transferts entre les réservoirs de biomasse, ceux de matière organique morte et le sol, selon des coefficients de transfert, ainsi que vers les usines de transformation lorsqu'il y a de la récolte forestière.

À partir des données sur le transfert de carbone vers les usines de transformation du bois, il est possible de simuler la circulation du carbone dans le réseau industriel grâce à un sous-modèle propre aux produits du bois (en anglais : Carbon Budget Model Framework for Harvested Wood Products). Celui-ci permet de modéliser la façon dont le bois est transformé en différents produits et de comptabiliser les émissions liées à la décomposition des produits lorsqu'ils sont utilisés sur les marchés. Les émissions annuelles de carbone liées à la décomposition des produits du bois sont basées sur la demi-vie de ces produits, c'est-à-dire le nombre d'années nécessaires pour que les produits aient émis 50 % de leur contenu en carbone. Par exemple, les valeurs de demi-vie suggérées par le GIEC sont de 35 ans pour les produits solides du sciage, 25 ans pour les panneaux et 2 ans pour les pâtes et papiers. Les émissions liées à la combustion de la bioénergie sont immédiates; tout le carbone cheminant dans cette partie du système est émis l'année même de sa récolte.

Enfin, on calcule les émissions liées à la récolte, au transport et à la transformation du bois en multipliant la quantité de bois (exprimée en unités de carbone contenu dans le bois) qui se retrouve dans les différents produits par des facteurs d'émissions (c.-à-d. une estimation de la quantité d'émissions de GES associées aux différentes opérations de la chaîne d'approvisionnement du bois).

Références :

Kurz, W.A., Dymond, C.C., White, T.M., Stinson, G., Shaw, C.H., Rampley, G.J. et al. 2009 CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 220 (4), 480-504.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R. et al. 2003 *Good practice guidance for land use, land-use change and forestry*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies: Kanagawa Prefecture, v + 593 pp.

DÉTAILS TECHNIQUES DU CALCUL DU PUIITS DE CARBONE 2018-2023

La quantification du puits de carbone de la Forêt Montmorency est effectuée de manière conjointe au calcul des possibilités forestières de coupe du territoire. Les possibilités forestières correspondent au volume maximal des récoltes annuelles, sans diminuer la capacité productive du milieu forestier, en tenant compte des objectifs et des contraintes d'aménagement du territoire. Le Bureau du Forestier en chef du Québec est responsable d'effectuer les calculs des possibilités forestières des forêts publiques québécoises; ces calculs sont effectués sur un horizon de 150 ans et sont mis à jour tous les 5 ans³. Les analystes du Bureau du Forestier en chef ont également développé une passerelle permettant de transférer les résultats des calculs des possibilités d'une stratégie d'aménagement donnée vers le modèle GCBM et le sous-modèle propre aux produits du bois (Encadré 3) pour quantifier les séquestrations et les émissions de carbone causées par cette stratégie.

Dans le cas de la Forêt Montmorency, le Bureau du Forestier en chef a accompagné une équipe de l'Université Laval pour les calculs des possibilités forestières de coupe et du bilan carbone pour le territoire de la Forêt Montmorency ainsi que pour les territoires avoisinants (cours normal des affaires).

STRATÉGIE DU COURS NORMAL DES AFFAIRES

D'abord, une première série de calculs a permis d'évaluer les possibilités forestières de la Forêt Montmorency selon le cours normal des affaires. La stratégie simulée était basée sur celle des territoires publics adjacents à la Forêt Montmorency, et reflétait la quantité moyenne de récolte et de travaux sylvicoles observée dans la région (Tableau 1), ainsi que les contraintes réglementaires prévues dans les lois (protection des bandes riveraines, protection de l'habitat du caribou, etc.). Ensuite, le bilan carbone de cette stratégie du cours normal des affaires a été calculé à l'aide du GCBM, et ce, sur un horizon de 100 ans. Bien que les calculs des possibilités forestières se fassent sur 150 ans, l'incertitude du modèle pour les flux de carbone devient trop grande au-delà de 100 ans. Cela a ainsi permis d'obtenir une estimation du profil des émissions et des séquestrations de carbone en provenance des écosystèmes forestiers du territoire au fil du temps.

Les volumes de bois récoltés dans la stratégie du cours normal des affaires ont ensuite été traités dans le sous-modèle Carbon Budget Model Framework for Harvested Wood Products, qui a permis d'évaluer les émissions liées à la décomposition des produits du bois lors de leur utilisation sur les marchés. Pour ce faire, le panier de produits moyen issu de la récolte et de la transformation du bois au Québec a été utilisé, car il représente les pratiques courantes du réseau industriel de la province (Tableau 2). Notons que le réservoir de produits du bois est considéré comme vide au début de la période de simulation; les émissions des produits provenant des récoltes passées ne sont donc pas comptabilisées.

³ Pour en savoir plus sur les calculs des possibilités forestières au Québec : <https://forestierenchef.gouv.qc.ca/documents/calcul-des-possibilites-forestieres/>



Puis, les émissions liées aux opérations de récolte, de transport et de transformation ont été calculées en fonction de la quantité de bois destinée aux différents produits du bois.

- > On assume que 0,0099 tonne d'équivalent CO₂ est émise vers l'atmosphère pour la récolte forestière et 0,0087 tonne d'équivalent CO₂ pour le transport, et ce, par mètre cube (m³) de bois transformé en produits.
- > Pour la transformation des produits du sciage (par exemple, le bois de charpente utilisé en construction) et des panneaux (fabriqués à partir de résidus du sciage de bois), les facteurs d'émission sont de 0,0205 et 0,0649 tonne d'équivalent CO₂ m⁻³.
- > Pour la fabrication des pâtes et papiers, on estime que 0,250 tonne d'équivalent CO₂ est émise pour chaque tonne de produit.

Concrètement, 0,1915 tonne d'équivalent CO₂ est émise vers l'atmosphère par tonne de carbone stocké en produits du sciage. Pour les panneaux et les pâtes et papiers, les valeurs sont respectivement de 0,3532 et 0,6725 tonne d'équivalent CO₂ par tonne de carbone stocké dans ces produits. Ces émissions ont ensuite été ajoutées à celles issues de la décomposition des produits du bois.

Les émissions provenant de la décomposition des produits du bois sont estimées à partir de la quantité de carbone stocké dans les différents produits du bois; on simule l'émission de ce carbone à partir d'une équation de décomposition exponentielle basée sur la demi-vie de chaque produit (Encadré 3).

Enfin, l'addition des séquestrations et des émissions provenant des écosystèmes forestiers et des produits du bois fournit une estimation du bilan carbone associé à la stratégie du cours normal des affaires, selon le périmètre comptable présenté à la Figure 3.

Références :

Sun, M., Wang, Y., Shi, L. and Klemeš, J.J. 2018 Uncovering energy use, carbon emissions and environmental burdens of pulp and paper industry: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 823-833.

Skog, K.E. 2008 Sequestration of carbon in harvested wood products for the United States. *For. Prod. J.* 58 (6), 56-72.

Athena Sustainable Materials Institute. 2018 A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Eastern Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber, p. 43.

Athena Sustainable Materials Institute. 2018 A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board – OSB, p. 33.

Athena Sustainable Materials Institute. 2018 A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Plywood, p. 33.



STRATÉGIE PROPRE AUX PRATIQUES DE L'UNIVERSITÉ LAVAL

Une deuxième série de calculs a été réalisée selon les mêmes étapes, mais cette fois en reflétant la stratégie d'aménagement et de production de bois propre aux pratiques de l'Université Laval telles qu'appliquées au cours des dernières années. Cette stratégie se distingue notamment du cours normal des affaires par un niveau de récolte forestière (possibilités forestières toutes espèces confondues) moins élevé (-7 967 m³ année⁻¹) et une plus grande proportion de superficies récoltées par coupe totale soumises au reboisement (0,38 vs 0,19 ha reboisé par ha récolté) (Tableau 1). Elle se distingue également par une plus grande proportion de produits du sciage issus du bois récolté, résultant notamment d'un allongement des révolutions de coupe et d'une agilité accrue en matière de sylviculture (Tableau 2).

Tableau 1. Récolte et travaux sylvicoles associés aux stratégies simulées

| Stratégie | Volume récolté (m ³) | Coupes totales (ha) | Coupes partielles (ha) | Reboisement (ha) | Éducation ⁴ (ha) |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------------|------------------|-----------------------------|
| Cours normal des affaires | 27 910 | 148 | 20 | 28 | 105 |
| Université Laval | 19 943 | 112 | 11 | 43 | 85 |

Tableau 2. Paniers de produits issus de la récolte du bois associés aux stratégies simulées

A- Panier de produits de la stratégie du cours normal des affaires (tiré de Beauregard et al. 2019)

| | Récolte bois marchand | | | Coproduits sciage | | |
|----------|----------------------------|-------------------------|---------|-------------------|---------|------------------|
| | Billes ⁵ Sciage | Billes Pâtes et papiers | Écorces | Sciage | Copeaux | Sciures-Planures |
| Résineux | 88 % | 0 % | 12 % | 48 % | 37 % | 15 % |
| Feuillus | 0 % | 88 % | 12 % | 0 % | 0 % | 0 % |

| | Allocation copeaux | | | Allocation sciures et planures | | | Allocation écorces |
|----------|--------------------|----------|------------|--------------------------------|----------|------------|--------------------|
| | Pâtes et papiers | Panneaux | Bioénergie | Pâtes et papiers | Panneaux | Bioénergie | Bioénergie |
| Résineux | 100 % | 0 % | 0 % | 90 % | 9 % | 1 % | 100 % |
| Feuillus | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 100 % |

⁴ Traitements et stratégies sylvicoles applicables aux divers peuplements en vue de favoriser leur régénération, leur croissance, leur résistance aux agents nuisibles et la qualité des tiges.

⁵ Une bille est une section d'arbre, un tronçon découpé.



B- Panier de produits de la stratégie de l'Université Laval (tiré de Paradis et al. 2019)

| | Récolte bois marchand | | | Coproduits sciage | | |
|----------|-----------------------|-------------------------|---------|-------------------|---------|------------------|
| | Billes Sciage | Billes Pâtes et papiers | Écorces | Sciage | Copeaux | Sciures-Planures |
| Résineux | 88 % | 0 % | 12 % | 60 % | 29 % | 12 % |
| Feuillus | 0 % | 88 % | 12 % | 0 % | 0 % | 0 % |

| | Allocation copeaux | | | Allocation sciures et planures | | | Allocation écorces |
|----------|--------------------|----------|------------|--------------------------------|----------|------------|--------------------|
| | Pâtes et papiers | Panneaux | Bioénergie | Pâtes et papiers | Panneaux | Bioénergie | Bioénergie |
| Résineux | 100 % | 0 % | 0 % | 90 % | 9 % | 1 % | 100 % |
| Feuillus | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 0 % | 100 % |

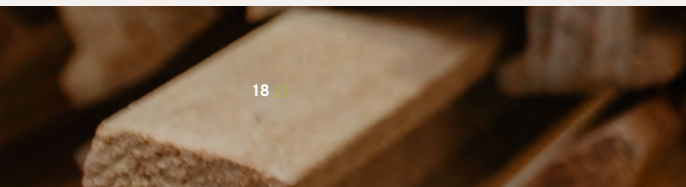
D'après les simulations réalisées, la stratégie de l'Université Laval permet d'obtenir une séquestration supérieure en forêt et des émissions inférieures associées aux produits, comparativement à la stratégie du cours normal des affaires (Figure 5), et donc, au total, un bilan carbone plus favorable.

L'augmentation du puits de carbone causée par les actions additionnelles de la stratégie de l'Université Laval par rapport au cours normal des affaires correspond à la moyenne annuelle de la différence entre le bilan carbone total de la stratégie de l'Université Laval et celui du cours normal des affaires. Bien que les simulations couvrent un horizon de 100 ans, on calcule la moyenne annuelle sur un horizon de 60 ans seulement (en faisant la somme des bilans annuels sur 60 ans), soit la longueur moyenne d'une révolution de coupe dans la sapinière boréale, respectant ainsi les principes utilisés dans les protocoles de crédits carbone forestiers. D'une part, cet horizon représente le temps nécessaire pour implanter une stratégie d'aménagement sur un territoire complet; d'autre part, l'incertitude des simulations augmente lorsqu'on s'intéresse à des périodes plus lointaines.

L'équation de la moyenne annuelle du puits de carbone est la suivante :

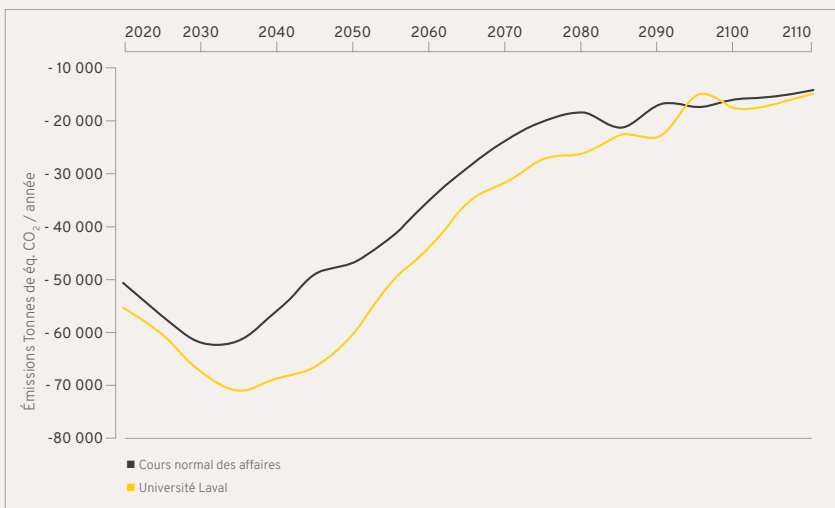
$$\text{Valeur annuelle du puits de carbone (tonnes d'équivalent de CO}_2\text{)} = \frac{\sum_{i=1}^{60} \text{bilan carbone U.Laval année } i - \sum_{i=1}^{60} \text{bilan carbone Cours normal des affaires année } i}{60}$$

La valeur de l'augmentation du puits de carbone ainsi calculée est de 14 413 tonnes d'équivalent CO₂ par année.

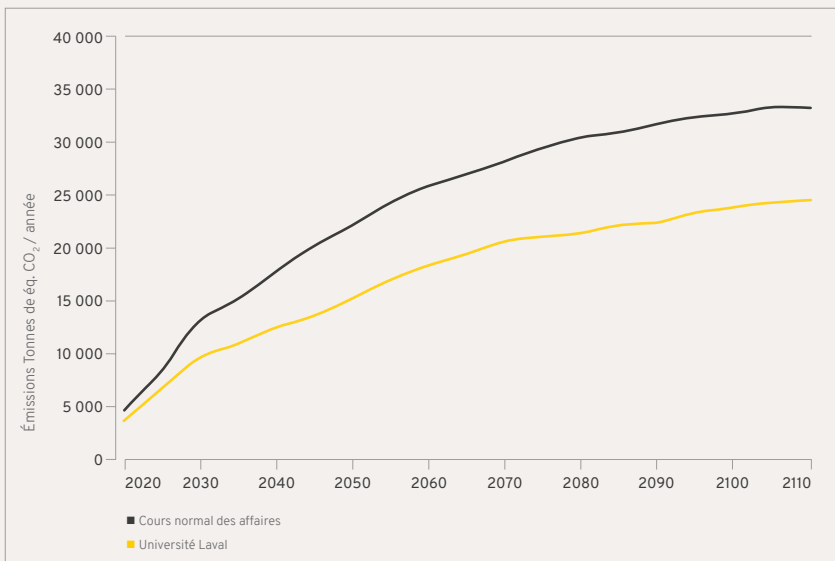




Écosystèmes forestiers



Produits du bois



Note : Valeur positive = émissions de CO_2 vers l'atmosphère; Valeur négative = séquestration de CO_2



DES STRATÉGIES D'AMÉNAGEMENT ANCRÉES DANS L'ACTION CLIMATIQUE

En conclusion, les coupes partielles ne constituent qu'une partie de la recette Université Laval. Comme mentionné dans le document, le puits actuel est associé à : un niveau de récolte forestière (possibilités forestières toutes espèces confondues) moins élevé (-7 967 m³ année⁻¹); une plus grande proportion de superficies récoltées par coupe totale soumises au reboisement (0,38 vs 0,19 ha reboisé par ha récolté) (Tableau 1); une plus grande proportion de produits du sciage issus du bois récolté, résultant notamment d'un allongement des révolutions de coupe et d'une agilité accrue en matière de sylviculture (Tableau 2). Pour les prochains calculs, l'intérêt d'augmenter la proportion de coupes partielles sera évalué.

Les calculs sur le puits de carbone sont étroitement liés au développement de stratégies d'aménagement polyvalent et à la mission d'exemplarité par l'expérimentation en sciences forestières de la Forêt Montmorency. La maximisation du puits de carbone doit donc être harmonisée aux autres objectifs du territoire, dont la production de bois et la protection de la biodiversité. Pour ce faire, le Comité scientifique et d'aménagement coordonne les travaux de recherche et travaille avec les groupes d'intérêts pour s'assurer que les interventions soient cohérentes avec la politique d'aménagement durable de la Forêt Montmorency.

Les travaux de recherche actuels et futurs sur le carbone forestier de la Forêt Montmorency permettent de valider les calculs, d'actualiser la valeur du puits de carbone et d'améliorer les pratiques d'aménagement. Ils visent notamment à évaluer l'efficacité de la coupe partielle (qui permet le maintien d'une partie du couvert forestier) en remplacement de la coupe totale (couramment utilisée en forêt boréale) pour maximiser la séquestration et le stockage de carbone dans les écosystèmes et les produits du bois, et pour assurer la résilience des paysages forestiers sous un climat changeant. D'autres travaux visent quant à eux à [étudier la dynamique du carbone dans les sols boréaux](#).

RÉFÉRENCES

Beaudoin, A., Bernier, P.Y., Guindon, L., Villemaire, P., Guo, X.J., Stinson, G., Bergeron, T., Magnussen, S., et Hall, R.J. 2014. Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery. *Canadian Journal of Forest Research* 44(5): 521-532. doi:10.1139/cjfr-2013-0401.

Beauregard, R., Lavoie, P., Thiffault, E., Ménard, I., Moreau, L., Boucher, J.-F. et al. 2019 Rapport du groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques: Québec, 53 p. Disponible : https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/Rapport_final_GTFCC.pdf

Grondin, P., Blouin, J., Racine, P., D'Avignon, H et Tremblay S., 1998. Rapport de classification écologique du sous-domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau blanc de l'est. Direction des inventaires forestiers, Ministère des Ressources naturelles du Québec. 261 pages.

Leblanc, M., et Bélanger, L. 2000. La sapinière vierge de la Forêt Montmorency et de sa région: une forêt boréale distincte. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Forêt Québec, Direction de la recherche forestière. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Divers/Memoire136.pdf>

Paradis, L., Thiffault, E. and Achim, A. 2019 Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 92 (3), 264-277.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R. et al. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies: Kanagawa Prefecture, v + 593 pp. p.

RÉDACTION

Évelyne Thiffault, professeure agrégée à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

Louis-Alexandre Giasson, auxiliaire de recherche de 2^e cycle à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique

