

Critère

4

Maintien de l'apport des écosystèmes forestiers aux grands cycles écologiques

14 Changements climatiques

15 Carbone forestier

14 Changements climatiques¹

Pourquoi cet enjeu est-il important ?

Parce que les changements climatiques exercent une influence sur la forêt, ses caractéristiques et sa dynamique, en changeant les conditions de croissance des arbres et en modifiant les régimes de perturbations naturelles auxquels elle est soumise.



Crédit photo : Simon Tremblay

Questions

1. Quels sont les effets probables des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers ?
2. Quelles sont les répercussions possibles des changements climatiques sur la forêt et le secteur forestier ?
3. Quelles sont les mesures d'adaptation possibles du secteur forestier ?

Mise en contexte

Le climat change². La communauté scientifique internationale a démontré que ces changements sont principalement dus à l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et que les activités humaines sont la source majeure de ces gaz³. Au Québec, depuis 1950, la température moyenne annuelle a augmenté de 1 à 3°C selon les régions et d'ici la fin du siècle, cette hausse pourrait avoisiner 4 à 7°C dans le sud et 5 à 10°C dans le nord du Québec⁴ (figure 1). Une telle hausse ne peut être sans conséquences; plusieurs événements climatiques inhabituels pourraient survenir au cours des prochaines années.

¹ Cet enjeu est davantage une revue de littérature des effets des changements climatiques sur la forêt à partir des trois questions posées, qu'un bilan sur les réalisations et les travaux durant 2008-2013.

² L'évolution du climat depuis le début du 20^e siècle a été démontrée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son premier rapport d'évaluation publié en 1990. Le 5^e rapport d'évaluation a été diffusé en 2013 et confirme sans équivoque le réchauffement du climat global.

³ Environnement Canada (2015).

⁴ Ouranos (2014). Le Québec en action Vert 2020 – Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020.

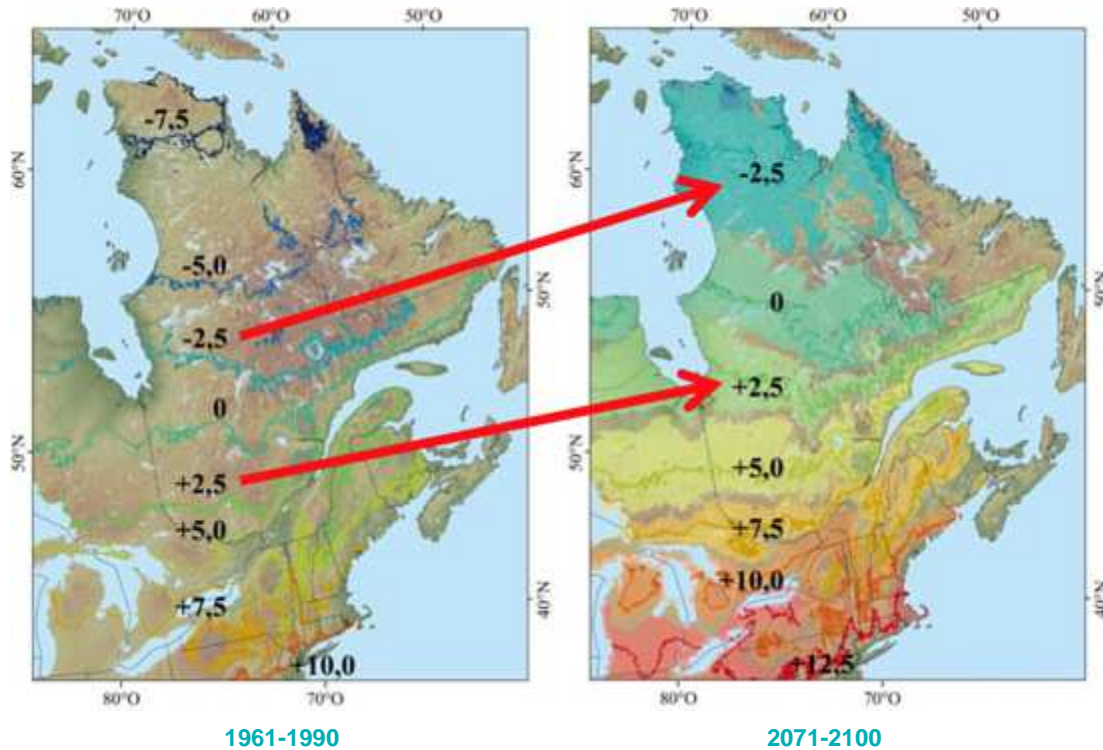


Figure 1. Déplacement anticipé des isothermes vers le nord⁵

Les changements moyens dans les températures et les précipitations se traduiront aussi par des mutations dans divers événements climatiques, dont la probabilité d'occurrence est plus ou moins bien connue⁶. Il semble ainsi fort probable que les événements suivants puissent se produire au cours des prochaines décennies :

- une diminution du couvert de glace et de la période d'englacement;
- un raccourcissement de la durée de la saison hivernale;
- une diminution de la fréquence et de l'intensité des vagues de froid;
- une accélération de la fonte du pergélisol;
- des périodes de canicule plus fréquentes et plus chaudes;
- des niveaux d'eau extrêmes en zones côtières lors des tempêtes.

Il paraît raisonnable de croire qu'il y aura aussi les événements suivants au cours des prochaines décennies :

- une augmentation des redoux hivernaux;
- une augmentation des fluctuations des niveaux d'eau (avec des phénomènes de fortes crues et des étiages plus bas) causant de l'érosion aux rives des cours d'eau;
- un déplacement vers le nord de la trajectoire des tempêtes;
- une augmentation du nombre total de tempêtes tropicales et des ouragans plus intenses;
- une prolongation des périodes de sécheresse estivale.

La plupart des activités économiques seront affectées par les changements appréhendés⁷. Certains changements pourraient engendrer des risques significatifs pour le secteur forestier (par exemple : croissance des arbres, périodes sans gel, composition des peuplements, épisodes de sécheresse et entretien des infrastructures).

⁵ Source :

https://www.google.ca/search?q=changements+climatiques+qu%C3%A9bec&biw=1600&bih=704&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0CAcQ_AUoAmoVChMI_IDOt-WGyAIVRyoeCh1ZqwhH#imgrc=8pMSH1aMxl5xXM%3A (consulté le 30 septembre 2015).

⁶ Source : MDDEP (2012a).

⁷ Ouranos (2014).

Dans son *Bilan d'aménagement forestier durable 2000-2008*⁸, le Forestier en chef a exposé succinctement le double rôle de la forêt et du secteur forestier dans la lutte aux changements climatiques, soit de contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de séquestrer plus de carbone (mesures d'atténuation). Il a recommandé d'intégrer les effets des changements climatiques dans la planification de l'aménagement (mesures d'adaptation). Le Bilan 2000-2008 a conduit au constat que le gouvernement ne se préoccupait pas suffisamment de l'effet des changements climatiques sur la forêt. Le Forestier en chef recommandait alors de poursuivre les efforts afin d'approfondir la compréhension des impacts potentiels et de mettre au point des pratiques forestières adaptées.

Analyse de la situation

Quels sont les effets probables des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers ?

À l'échelle mondiale, le climat futur dépend principalement du niveau de l'activité économique, de la croissance démographique et de l'évolution technologique⁹. Ceci oblige d'envisager plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, tous aussi probables les uns que les autres. Il demeure toutefois difficile de prévoir l'ampleur et la nature des changements à venir¹⁰ car le niveau d'incertitude des prévisions est élevé.

Pour les écosystèmes forestiers, les effets des changements climatiques seront multiples selon plusieurs recherches menées sur le sujet¹¹. Par exemple, l'allongement de la saison de croissance, la disponibilité accrue du CO₂ et des nutriments, des précipitations plus abondantes et une réduction de l'épaisseur de la matière organique, notamment en raison de feux plus fréquents, pourraient avoir une influence sur les services écologiques de la forêt. La fréquence, la durée et l'intensité des perturbations causées par des agents abiotiques (Enjeu 6) (par exemple, précipitations intenses, sécheresse, vent, verglas et feu) devraient augmenter, ce qui aura tendance à favoriser les essences de début de succession lors de l'ouverture du couvert forestier. De plus, des essences bien adaptées aux événements extrêmes pourraient être en difficulté si les arbres ne peuvent atteindre l'âge de produire des graines. Enfin, l'élévation des températures et la réduction des vagues de froid hivernal risquent d'augmenter les dommages causés par les insectes et les maladies (Enjeu 7).

D'autres recherches récentes suggèrent que, dans le futur, la sécheresse pourrait être le stress physique le plus important pour les écosystèmes terrestres, entraînant des feux plus fréquents, des réductions de la croissance et une mortalité accrue des arbres¹². Les projections climatiques actuelles pour le Québec montrent un assèchement des sols (moyennes annuelle et estivale) pour l'horizon 2081-2100¹³.

Avec les changements climatiques, la biodiversité pourrait être affectée par d'autres changements : perte d'espèces indigènes, invasion d'espèces exotiques, etc. (Enjeu 7). Or, avec le déplacement des aires de répartition des espèces indigènes (figure 2), dans beaucoup d'endroits au Québec, ce ne sont pas des espèces

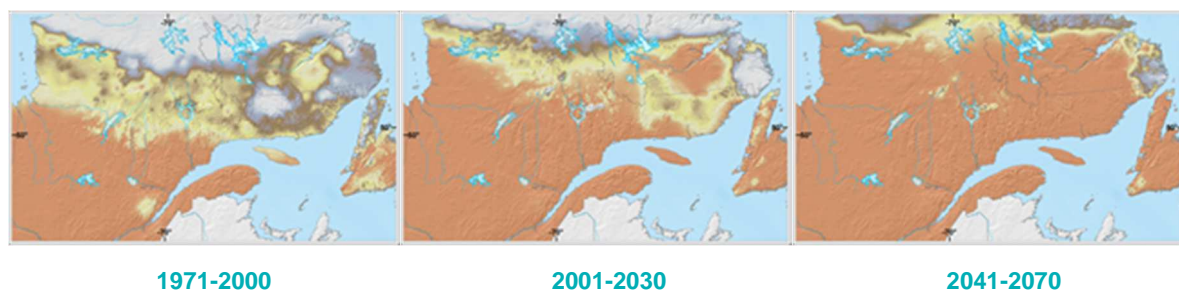


Figure 2. Scénario de dispersion de la TBE¹⁴

⁸ Bureau du forestier en chef (2010).

⁹ <http://www.sei-international.org/mediamanager/documents/A-guide-to-RCPs.pdf> (consulté le 7 septembre 2015).

¹⁰ Logan et coll. (2011).

¹¹ Ouranos (2014), Johnston (2010).

¹² Bin et coll. (2014).

¹³ Ouranos (2014).

¹⁴ Régnière et coll. (2008).

exotiques qui vont supplanter des espèces indigènes jusque-là présentes dans une forêt donnée, mais des espèces indigènes venant du sud du Québec et qui seront progressivement les mieux adaptées aux nouvelles conditions. Dans un contexte de changements globaux, l'introduction d'espèces exotiques demeure quand même une des plus grandes menaces et ces espèces pourraient supplanter des essences indigènes même dans un contexte de changements climatiques. En tenant compte de cette réalité lorsqu'il sera question de faire évoluer la composition des écosystèmes forestiers pour tenir compte des changements climatiques, le choix des essences de « remplacement » deviendra un enjeu socioéconomique et environnemental important.

D'autre part, le risque d'invasion par des espèces exotiques pourrait être bénéfique et un choix délibéré pour introduire une espèce exotique pourrait être justifiable. Ces espèces exotiques pourraient, dans certains cas, amener de nouvelles réalités, sans être « nuisibles ». Enfin, dans le cas où le climat évolue mais reste dans des conditions acceptables pour une espèce indigène donnée, la génétique de cette espèce pourrait ne pas être adaptée aux nouvelles conditions climatiques. Ainsi, une essence donnée pourrait montrer des signes de mésadaptation alors que le climat lui reste favorable.

Pour comprendre et prévoir les effets des changements climatiques sur la biodiversité, des analyses sur la répartition de près de 1 000 espèces animales et végétales ont été réalisées au Québec¹⁵. À l'aide des modèles de prévision et d'informations récentes, il a été possible de dresser un portrait des effets anticipés au Québec. Dans un contexte d'aménagement durable de la forêt fondé sur un aménagement écosystémique et sur la conservation de la biodiversité¹⁶, ces connaissances servent d'hypothèses pour développer les options éventuelles d'adaptation (figure 3).

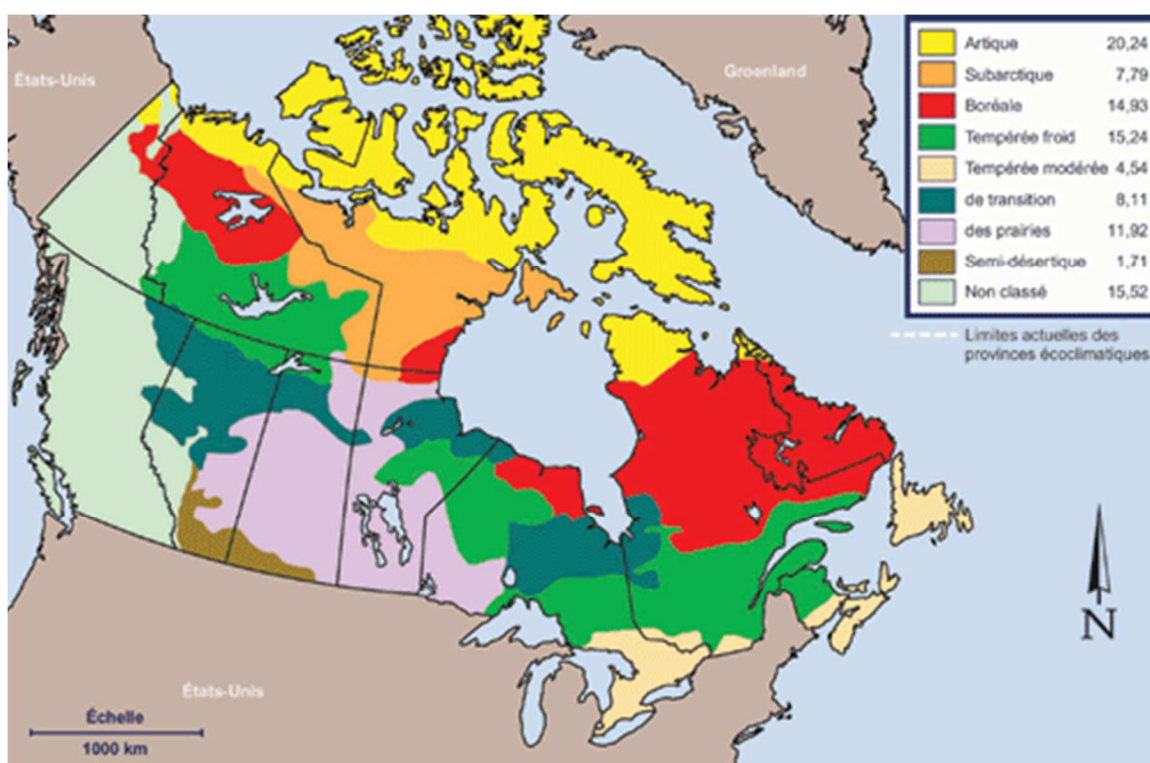


Figure 3. Limites prévues des provinces écoclimatiques du Canada en fonction des changements provoqués par le doublement de la teneur en CO₂ de l'atmosphère¹⁷

¹⁵ Berteaux et coll. (2014) et Périé et coll. (2014).

¹⁶ Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier, art. 1 et 2.

¹⁷ Source :

https://www.google.ca/search?q=changements+climatiques+qu%C3%A9bec&biw=1600&bih=704&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0CAc_Q_AUoAmoVChMI_IDOt-WGyAIVRyoeCh1ZqwhH#imgrc=qpPaCUI-dv1OGM%3A (consulté le 30 septembre 2015).

Quelles sont les répercussions possibles des changements climatiques sur la forêt et le secteur forestier ?

Les impacts des changements climatiques sur la forêt sont sans équivoque et certains sont déjà perceptibles : animaux ravageurs, incendies, sécheresses, dépérissement et perte de productivité¹⁸. Les habitats des espèces animales et végétales seront modifiés, ce qui posera de nouveaux défis d'aménagement¹⁹.

Pour aménager la forêt face à un futur incertain, il n'y a plus de « meilleur choix » possible. La dynamique écologique sur laquelle reposaient les décisions d'aménagement s'est modifiée. Puisque les transitions écologiques sont maintenant plus difficiles à prévoir, les mesures d'aménagement devraient viser à construire un portefeuille d'options sylvicoles pour augmenter la capacité d'adaptation de la forêt.

Pour planifier l'aménagement de la forêt, il faudrait envisager plusieurs états possibles et viser à augmenter la résilience et l'adaptabilité des écosystèmes selon une approche à solutions multiples favorisant l'acquisition de connaissances : la foresterie de l'adaptation²⁰. L'introduction de mesures d'adaptation présente certes des risques, mais poursuivre l'aménagement de la forêt sans tenter de s'adapter aux nouvelles conditions comporte aussi des risques²¹. Dans un tel contexte, il devient essentiel d'évaluer chacune des options et de faire les choix qui semblent les plus appropriés. Le Guide sylvicole du Québec²² présente un portrait succinct de la situation et suggère quelques avenues à considérer par le sylviculteur pour adapter ses interventions en forêt.

Ce que le sylviculteur doit retenir à propos des changements climatiques – Extraits²³

Les conditions actuelles de température et de précipitations influencent directement et indirectement la survie, la reproduction et la croissance des arbres de même que la dynamique des peuplements. Les changements climatiques peuvent exacerber certaines situations actuellement inquiétantes ou créer d'autres problèmes aux endroits où il n'y en avait pas.

L'adaptation aux changements climatiques requiert de faire d'abord un diagnostic de la vulnérabilité actuelle des peuplements avant d'explorer leur vulnérabilité potentielle. L'aménagement de la forêt et la sylviculture des peuplements sont des leviers essentiels pour s'adapter car il est possible d'intervenir concrètement en considérant, entre autres, les éléments suivants :

- les périodes de rotation dans la forêt de structure irrégulière;
- l'âge de révolution dans les peuplements et les plantations de structure régulière;
- le choix des essences et des provenances de plants pour le reboisement;
- le choix des essences à promouvoir en forêt naturelle;
- la gestion de la densité des peuplements.

Le défi posé par les changements climatiques réside dans le fait que les conditions environnementales qui prévaudront dans le prochain siècle risquent d'être fort différentes de celles qui prévalent de nos jours.

Le secteur forestier devra aussi identifier sa vulnérabilité et adapter ses pratiques en fonction des changements climatiques²⁴. Pour ce faire, les nouvelles situations probables à considérer peuvent être les suivantes :

- des espèces envahissantes ou nuisibles pourraient modifier la composition de la forêt;
- les perturbations naturelles accrues pourraient augmenter le volume de bois de récupération et diminuer la proportion de vieilles forêts;

¹⁸ Bernier et Ste-Marie (2014).

¹⁹ Périé et coll. (2014).

²⁰ Doyon et coll. (2014), Jetté (2014).

²¹ Campagna (2014).

²² <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-guide-sylvicole.jsp> (consulté le 7 septembre 2015).

²³ Campagna et coll. (2013).

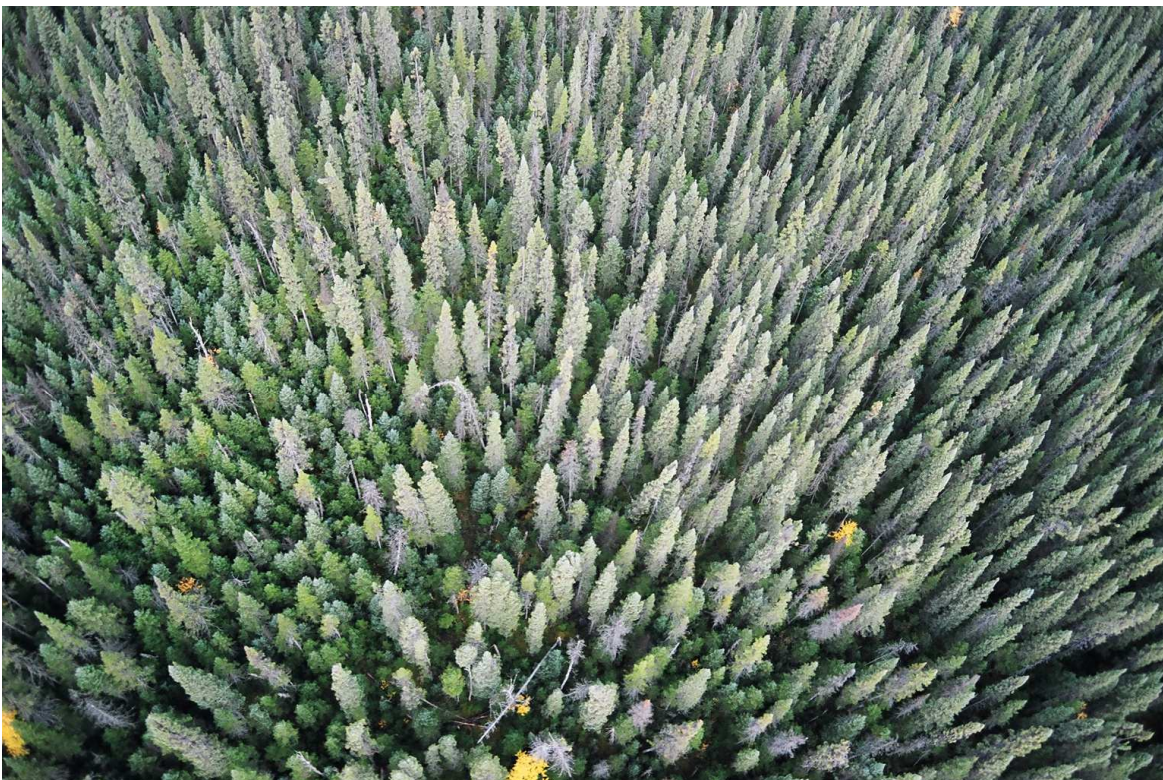
²⁴ Ouranos (2014), Doyon et coll. (2014), Bernier et Ste-Marie (2014).

- l'augmentation des précipitations pourrait causer des bris aux infrastructures routières;
- les hivers plus doux et les dégels pourraient réduire l'accès à la forêt;
- les feux plus fréquents et plus sévères pourraient entraîner plus d'interruptions des opérations;
- la santé et la sécurité des travailleurs pourraient être plus à risque en raison d'événement météorologiques extrêmes ou de l'incidence accrue de maladies transmissibles par des insectes, telles que le virus du Nil et la maladie de Lyme.

Devant l'ampleur des impacts appréhendés, il est suggéré que « *les changements climatiques et leur variabilité soient considérés dans tous les aspects de l'aménagement forestier durable* »²⁵. Le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a produit plusieurs documents de référence depuis 2010, afin d'appuyer les efforts en ce sens²⁶. Par ailleurs, le Service canadien des forêts a proposé une approche d'adaptation proactive fondée sur la connaissance des changements potentiels, la détermination à intervenir et la mise en œuvre de mesures d'adaptation²⁷. Des indicateurs (climatiques, forestiers et humains), ainsi que des critères de sélection permettant d'élaborer un système de suivi, sont suggérés aux intervenants du secteur forestier.

Quelles sont les mesures d'adaptation possibles du secteur forestier ?

Face au constat que les changements climatiques sont sans équivoque et qu'ils risquent de s'accroître malgré les mesures d'atténuation envisagées, la mise en œuvre de mesures adaptées est essentielle. La revue de littérature permet de recenser 16 mesures de surveillance, 88 mesures visant à modifier les pratiques forestières et 15 mesures destinées à renforcer la capacité d'adaptation des écosystèmes forestiers, dont quelques-unes apparaissent au tableau 1²⁸. Cette liste ne peut être exhaustive ni d'application générale puisque l'adaptation est un processus continu et évolutif qu'il faut constamment ajuster aux effets constatés et aux impacts anticipés.



Crédit photo : Héroïse Rheault

²⁵ Williamson et Edward (2014).

²⁶ Voir le site Internet du Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) <http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp> (consulté le 14 août 2015).

²⁷ Gauthier et coll. (2014).

²⁸ Doyon et coll. (2012).

Tableau 1. Exemples de mesures d'adaptation²⁹

Types de mesures		Exemples de mesures
Suivis, surveillance et monitoring		Informar les collectivités des risques de feux au moyen de l'indice Forêt-Météo ³⁰ . Faire un suivi de la croissance des arbres. Suivre les populations d'insectes et acquérir de meilleures connaissances sur l'influence du climat sur celles-ci.
Changements de pratique	Feux	Accroître l'utilisation du brûlage dirigé pour minimiser l'accumulation de combustible. Protéger du feu les zones à haute valeur par des techniques Intelli-Feu ³¹ .
	Insectes et maladies	Raccourcir la durée de rotation pour réduire la période de vulnérabilité d'un peuplement et pour faciliter le changement vers d'autres espèces mieux appropriées.
	Croissance et productivité	Planter des géotypes de remplacement ou de nouvelles espèces en prévision du climat futur.
	Météo extrême	Augmenter la taille des ponceaux et faire des calculs de débits de pointes appropriés pour trouver une marge de précaution.
	Migration et biodiversité	Maintenir la connectivité dans un paysage varié et dynamique.
	Impacts socio-économiques	Développer des technologies pour utiliser le bois selon ses nouvelles qualités et dimensions.
Capacité d'adaptation		Diversifier l'économie régionale. Tenir compte des changements climatiques dans les plans d'affectation du territoire et envisager des modifications. Estimer les incertitudes liées aux projections climatiques et à leurs conséquences potentielles.

Le travail de l'aménagiste forestier devrait contribuer à augmenter la capacité d'adaptation de la forêt. Cependant, une des principales difficultés pour y arriver réside dans le fait que, même si des tendances peuvent être décelées, il n'est pas toujours possible de savoir ce à quoi la forêt va devoir s'adapter, de sorte qu'il faudra gérer l'incertitude. Par exemple, cela peut se faire en initiant des choix d'essences pour le reboisement, ce qui aura pour effet d'augmenter l'adaptation de la forêt aux changements climatiques. Cela revient aussi à augmenter la diversité des peuplements, la diversité des essences au sein des peuplements et/ou la diversité génétique au sein des essences.

Constats pour la période 2008-2013

Pour la période 2008-2013, il y a eu plusieurs travaux de recherche au Québec mais peu de mécanismes d'adaptation d'envergure documentés dans le secteur forestier pour faire face aux changements climatiques. Par contre, plusieurs initiatives se sont développées pour comprendre le phénomène, maîtriser ses effets et bien l'intégrer à la planification forestière.

Fondé en 2001, le Consortium dénommé Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques a été mis en place. Il regroupe plus de 450 scientifiques et professionnels. Dans les travaux entrepris, l'organisme a produit une synthèse des connaissances sur les changements climatiques³², leurs causes et leurs effets. Plusieurs éléments du rapport concernent le secteur forestier.

²⁹ Tiré de Doyon et coll. (2012).

³⁰ <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/cartes/fw?type=fwi> (consulté le 7 septembre 2015).

³¹ <http://publications.gc.ca/site/eng/284206/publication.html> (consulté le 7 septembre 2015).

³² <http://www.ouranos.ca/fr/synthese2014/> (consulté le 7 septembre 2015).

Actions gouvernementales en matière d'aménagement durable des forêts

Plan d'action

Le Gouvernement du Québec a conduit divers travaux qui ont mené à la diffusion du *Plan d'action sur les changements climatiques* couvrant la période 2006-2012³³. Le bilan des engagements contenus dans ce plan a été fait en 2014³⁴. Les nouvelles connaissances acquises au cours de la période antérieure ont conduit au Plan d'action 2013-2020³⁵, accompagné d'une *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques*³⁶. Dans ce Plan d'action, deux priorités sont de nature à influencer le secteur forestier :

- **Soutenir les acteurs économiques vulnérables** : la priorité 27 du Plan d'action vise l'adoption d'une gestion préventive et adaptative des ressources forestières, sur la base d'une anticipation documentée des effets des changements climatiques sur la forêt (productivité, perturbations naturelles, etc.).
- **Actualiser les outils d'évaluation, de protection et de gestion de la biodiversité et des écosystèmes** : la priorité 29 du Plan d'action a pour objectif de préserver la résilience des écosystèmes, en évaluant le niveau de vulnérabilité des écosystèmes et des espèces (faune et flore) qui ont une importance majeure au plan environnemental, économique ou social. Elle vise aussi à mettre en œuvre des méthodes de détection et de contrôle des espèces exotiques envahissantes (Enjeu 7). Par ailleurs, de nouveaux outils visant à estimer la valeur monétaire des services écologiques seront développés, de façon à préserver les bénéfices qu'offrent les écosystèmes.

Stratégie d'adaptation

En matière de foresterie, la *Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques* mentionne que « le Ministère a entrepris plusieurs projets portant sur les effets des changements climatiques sur la forêt »³⁷. Le second Plan d'action (PACC 2020) inclut une action (27.5 – Vulnérabilité des forêts et des activités forestières aux changements climatiques) dotée d'un budget de 4,5 M\$ afin de documenter et d'anticiper les effets des changements climatiques sur la forêt du Québec.

Par ailleurs, le Ministère a réalisé des actions spécifiques :

- la Direction de la recherche forestière (DRF) a conduit ou conduit encore une quinzaine de projets de recherche (internes ou en partenariat) relatifs aux impacts des changements climatiques sur la forêt³⁸;
- la Direction générale de la production de semences et de plants forestiers (DGSPF) gère l'utilisation des sources de semences pour le reboisement. Les règles de déplacements des sources de semences tiennent compte des relations entre les variables climatiques et la variabilité génétique des provenances. La Direction générale de la production de semences et de plants forestiers travaille, en collaboration avec la Direction de la recherche forestière, à l'adaptation de ces règles de déplacement en fonction de modèles mathématiques³⁹ développés pour l'épinette blanche, l'épinette noire et le pin gris⁴⁰ et de l'évolution potentielle des aires de répartition de ces espèces au Québec;
- la Direction de l'aménagement et de l'environnement forestiers (DAEF) travaille aussi sur les orientations à risque et sur l'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques.

Perspective future

Les engagements du Plan d'action gouvernemental sur les changements climatiques 2006-2012 ont fait l'objet d'un bilan en 2014⁴¹. Il ressort de cette évaluation qu'un Fonds Vert qui finance la réalisation de projets de recherche⁴² devrait favoriser l'intégration de mesures d'adaptation aux changements climatiques dans les

³³ MDDEP (2008).

³⁴ MDDELCC (2014).

³⁵ MDDEP (2012b).

³⁶ MDDEP (2012a).

³⁷ MDDEP (2012a).

³⁸ <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/activites-recherche/projets/index.asp> (consulté le 7 septembre 2015).

³⁹ Rainville et coll. (2014).

⁴⁰ Ouranos (2014). (S. Carles, DGSPF : communication personnelle, 13 février 2015).

⁴¹ MDDELCC (2014).

⁴² Plus de 15 projets de recherche ont été réalisés sur des sujets tels que la migration des niches écologiques et des espèces, la fertilité des sols, la croissance, le recrutement, la mortalité, la dynamique forestière historique et la production du sirop d'érable.

stratégies et les plans d'aménagement couvrant la période 2018-2023. Aussi, le financement accordé à Ouranos se concentre à bien documenter des nouvelles thématiques de recherche : la biodiversité et les écosystèmes. Le volet « Ressources forestières » est en lien direct avec la problématique du secteur forestier⁴³.

Par ailleurs, un des défis de la Stratégie d'aménagement durable des forêts (SADF)⁴⁴ formule le besoin de lutter contre les changements climatiques par la mise en place de mécanismes d'adaptation. Cette idée s'exprime dans l'objectif : « *Des forêts et un secteur forestier qui contribuent à la lutte contre les changements climatiques et qui s'y adaptent* ». Deux orientations sont présentées pour relever ce défi :

- utiliser davantage la biomasse et les produits forestiers pour réduire les émissions de GES (remplacer les combustibles fossiles et promouvoir la construction verte);
- intégrer le carbone forestier et les changements climatiques dans la gestion et l'aménagement de la forêt (effets sur le réservoir de carbone, intégration de mesures d'adaptation et gestion des perturbations naturelles) (Enjeu 15).

De son côté, le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs conduit actuellement plusieurs projets visant à répondre aux effets appréhendés des changements climatiques⁴⁵. Les lignes directrices pour la mise en œuvre de l'aménagement écosystémique sont en révision, en particulier les orientations concernant la composition de la forêt (Enjeu 3). Les hypothèses relatives à la récurrence des feux (Enjeu 6) sont aussi en révision afin de les ajuster aux tendances anticipées. La priorité de ces travaux est d'analyser les éléments les plus à risque en fonction de plusieurs scénarios de changements probables, afin de prendre en compte ces informations dans le processus de planification forestière couvrant la période 2018-2023⁴⁶.

Il est également prévu que le tome 3 du Guide sylvicole sera publié en version électronique en 2015. Il présentera les scénarios sylvicoles⁴⁷ possibles pour les situations fréquemment rencontrées en forêt publique. Les modifications prévues à ce Guide sylvicole permettront la planification de la période 2023-2028 afin d'identifier des stations où les essences risquent de se retrouver hors de leur enveloppe climatique⁴⁸.

De plus, pour le Plan d'action 2013-2020, le gouvernement prévoit poursuivre l'acquisition de connaissances sur la croissance des arbres, la fertilité des sols et la biodiversité, afin d'ajuster les hypothèses du calcul des possibilités forestières réalisées au Bureau du forestier en chef. La gestion forestière devra conduire à l'élaboration de mesures adaptatives (faire face aux changements en cours), préventives (anticiper les conditions futures), ou réactives (gérer les événements catastrophiques). Une démarche de gestion des risques sera développée. Les pratiques de gestion des perturbations naturelles seront revues, en lien avec la Stratégie canadienne en matière de feux de forêt⁴⁹.

Pistes d'amélioration

Le climat et les changements climatiques sont des paramètres écologiques de haut niveau spatial et temporel.

Recommandations techniques

- Anticiper les changements et renforcer la résilience des écosystèmes forestiers.
- Poursuivre l'acquisition de connaissances et mettre en place des mesures de suivi.
- Continuer les analyses de la vulnérabilité de la forêt et du secteur forestier québécois.

Recommandations de gestion

- Prendre en compte, dans la planification forestière, certaines mesures qui pourraient contribuer à atténuer les effets des changements climatiques appréhendés.

⁴³ <http://www.ouranos.ca/fr/programmation-scientifique/via/ressources-forestieres.php> (consulté le 25 octobre 2015).

⁴⁴ Document « Projet » soumis à la consultation en 2012.

⁴⁵ J.-P. Jetté, DAEF, communication personnelle, mars 2015.

⁴⁶ Des adaptations mineures ont été apportées au Guide sylvicole pour la période 2018-2023, mais aucune modification n'a encore été intégrée dans le processus de production des PAFI-T.

⁴⁷ Un scénario sylvicole se définit comme une séquence planifiée de traitements sylvicoles qui conduit à l'établissement d'un peuplement visé.

⁴⁸ P. Beaupré, DAEF, communication personnelle, mars 2015.

⁴⁹ <http://www.ccmf.org/francais/coreproducts-cwfs.asp> (consulté le 7 septembre 2015).

- Développer et mettre en œuvre une stratégie globale pour ensuite avoir une démarche régionale d'identification des risques majeurs et mettre en œuvre des mesures d'adaptation qui s'inscrivent dans cette stratégie globale.

Références

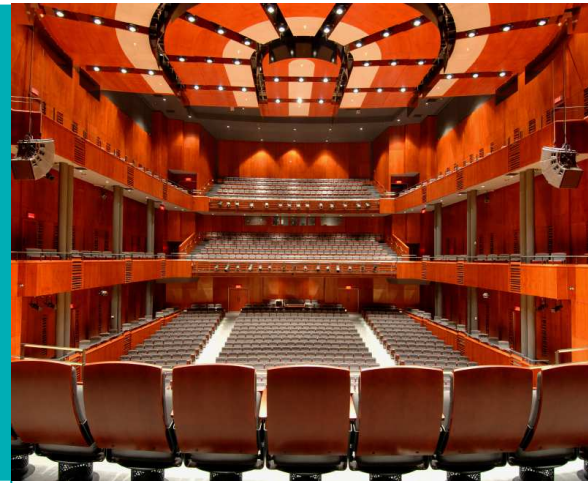
- Bernier, P. et C. Ste-Marie (2014). Changement climatique et aménagement forestier. Présentation en ligne au personnel du BFEC. 05 mars 2014.
- Berteaux, D., N. Casajus, S. de Blois, T. Logan et C. Périé (2014). Changements climatiques et biodiversité du Québec. Vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec, 202 p.
- Bin, H., C. Xuefeng, W. Honglin et C. Aifang (2014). Drought : the most important physical stress of terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 34: 179-183.
- Bureau du forestier en chef (2010). Bilan d'aménagement forestier durable au Québec 2000-2008. Gouvernement du Québec, Roberval (Qc), 290 p.
- Campagna, M. (2014). Les changements climatiques et les forêts. Quelques considérations pour l'aménagement forestier et le calcul des possibilités forestières. Présentation à la rencontre générale du BFEC, 14 mai 2014.
- Campagna, M., F. Mussenberger, B. Boulet et M. Seto (2013). Chapitre 7 Dans *Le guide sylvicole du Québec*. Tome 1. Les fondements de la sylviculture. Les Publications du Québec, p. 711-724.
- Conseil canadien des ministres des forêts (2008). Une vision pour les forêts du Canada : 2008 et au-delà. http://www.ccfm.org/pdf/Vision_FR.pdf (consulté le 3 novembre 2015).
- Doyon, F., A. Montpetit et D. Cyr (2012). Avis scientifique sur l'impact des changements climatiques sur les forêts de l'Outaouais et l'adaptation du secteur forestier. Rapport de l'Institut des sciences de la forêt tempérée (UQO), Ripon (Qc), avril 2013. 95 p. + 5 annexes.
- Doyon, F., P. Nolet et C. Messier (2014). L'aménagement forestier et la sylviculture comme outils d'adaptation de la forêt aux changements globaux. Colloque du SCF-CFL. Ressources naturelles Canada, 13 novembre 2014. http://www.partenariat.qc.ca/videoconferences/presentation_frederik_doyon_13%20novembre%202014.pdf (consulté le 26 octobre 2015).
- Environnement Canada (2015). Étude et science du changement climatique <http://www.ec.gc.ca/sc-cs/default.asp?lang=Fr&n=56010B41-1> (consulté le 13 novembre 2015).
- Gauthier, S., M. Lorente, L. Kremsater, L. De Grandpré, P.J. Burton, I. Aubin, E.H. Hogg, S. Nadeau, E.A. Nelson, A.R. Taylor et C. Ste-Marie (2014). Suivi des effets des changements climatiques : indicateurs potentiels pour les forêts et le secteur forestier du Canada. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa (On), 91 p.
- Jetté, J.-P. (2014). L'aménagement écosystémique au Québec : où en sommes-nous? Vers où allons-nous? Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Conférence-midi, 26 novembre 2014.
- Johnston, M.-H. (2010). Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et proposition de mesures visant leur adaptation. Un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier. Conseil canadien des ministres des forêts, 47 p.
- Logan, T., I. Charron, D. Chaumont et D. Houle (2011). Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise, p. 124. Montréal http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf (consulté le 3 novembre 2015).
- MDDELCC (2014). Plan d'action sur les changements climatiques – Bilan 2012-2013. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/bilan-2012-2013/bilan-PACC-2012-2013.pdf> (consulté le 3 novembre 2015).
- MDDEP (2008). Le Québec et les changements climatiques – Un défi pour l'avenir. Plan d'action 2006-2012 http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/2006-2012_fr.pdf (consulté le 3 novembre 2015).
- MDDEP (2012a). Le Québec en action Vert 2020 – Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques – Phase 1. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf (consulté le 26 octobre 2015).
- MDDEP (2012b). Le Québec en action Vert 2020 – Stratégie gouvernementale d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020 – Un effort collectif pour renforcer la résilience de la société québécoise http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/strategie-adaptation2013-2020.pdf (consulté le 26 octobre 2015).
- Ouranos (2014). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. <http://www.ouranos.ca/fr/synthese2014/> (consulté le 16 février 2015).
- Périé, C., S. de Blois, M.-C. Lambert et N. Casajus (2014). Effets anticipés des changements climatiques sur l'habitat des espèces arborescentes au Québec. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière ; n° 173, xvii + 46 p.
- Rainville, A., J. Beaulieu, L. Langevin, T. Logan et M.-C. Lambert (2014). Prédire l'effet des changements climatiques sur le volume marchand des principales espèces résineuses plantées au Québec, grâce à la génétique forestière. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière ; n° 174, 58 p.
- Régnière, J., V. Nealis et B. Cooke (2008). Spruce budworm : what's new and why it matters ?, Forest Pest Management Forum 2008, décembre, Gatineau. http://www.glfsc.forestry.ca/VLF/ForumPresentations/regnieresbw_08e.pdf (consulté le 3 novembre 2015)
- Williamson, T.B. et J.E. Edwards (2014). Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : critères et indicateurs dans un contexte de climat en changement. Conseil canadien des ministres des forêts. Groupe de travail sur les changements climatiques. x + 18 pages.

15

Carbone forestier¹

Pourquoi cet enjeu est-il important ?

Pour maintenir et augmenter le stock de carbone dans les réservoirs de l'écosystème et des produits forestiers afin de contribuer à compenser les émissions.



Crédit photo : MFFP

Question

1. Quel est le bilan de carbone (émissions et séquestration) associé aux réservoirs de la partie marchande de l'arbre en croissance et dans les produits forestiers entre 2013 et 2038 ?

Mise en contexte

L'écosystème forestier, l'aménagement forestier et l'industrie forestière jouent un rôle important dans le cycle du carbone et contribuent à l'atténuation du réchauffement global de la planète et des changements climatiques². Parmi les grands cycles planétaires, celui du carbone présente un intérêt particulier pour le secteur forestier puisqu'il se trouve en énorme quantité dans les arbres.

Dans le secteur forestier, la quantification des stocks de carbone s'effectue selon un principe de vases communicants. Les changements dans les stocks de carbone sont exprimés sous forme de séquestration (stockage dans les puits), de rétention (entreposage) et d'émissions (sources) de CO₂ en relation avec l'écosystème forestier, les produits forestiers et l'atmosphère, respectivement. L'écosystème forestier constitue un réservoir ayant une capacité maximale de séquestration et de stockage de carbone par l'intermédiaire de la photosynthèse. Toutefois, l'intégration des produits forestiers et les avantages de leur substitution à d'autres matériaux de construction ou comme sources d'énergie ont démontré que leur contribution à long terme est d'une

¹ Cet enjeu constitue davantage une étude prospective sur le carbone forestier pour la période 2013-2038 à l'aide des stratégies 2013-2018 qu'un Bilan pour la période 2008-2013.

² Apps et coll. (1999), Birdsey et Pan (2015) <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32574.pdf> (consulté le 17 septembre 2015).

grande importance³. Pour juger de la contribution du secteur forestier à l'atténuation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, il est essentiel de considérer l'apport des produits forestiers et des effets de substitution⁴.

Le cycle du carbone⁵

La photosynthèse est le processus d'échange le plus important de la planète (figure 1). Il s'agit d'une réaction biochimique où, sous l'effet de l'énergie solaire, les organismes végétaux transforment le carbone (C) contenu dans le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique et l'eau (H₂O). De fait, le carbone constitue environ 50 % de la biomasse végétale sèche, incluant le bois⁶. La photosynthèse constitue la principale voie de transformation du carbone minéral en carbone organique.

La forêt couvre près d'un tiers de la surface émergée de la planète et représente près de la moitié du réservoir de carbone terrestre. En 2015, il est estimé que les forêts de la Terre emmagasinent 296 GT de carbone dans la biomasse aérienne et souterraine, qui contient presque la moitié du carbone stocké dans les forêts⁷. Selon la FAO, la forêt joue un rôle important dans l'atténuation des changements climatiques par la séquestration et la substitution⁸. Premièrement, elle capte le carbone de l'atmosphère et l'emmagasine dans les arbres, la litière et le sol. Deuxièmement, elle fournit du bois, de la fibre et de l'énergie pour satisfaire les besoins humains⁹. D'après le GIEC¹⁰, moins de la moitié des émissions humaines restent dans l'atmosphère. La forêt absorbe à elle seule près de 25 % de tout le CO₂ émis par l'humanité chaque année. Ainsi, le rôle de la forêt dans la séquestration du CO₂ constitue désormais un enjeu majeur.

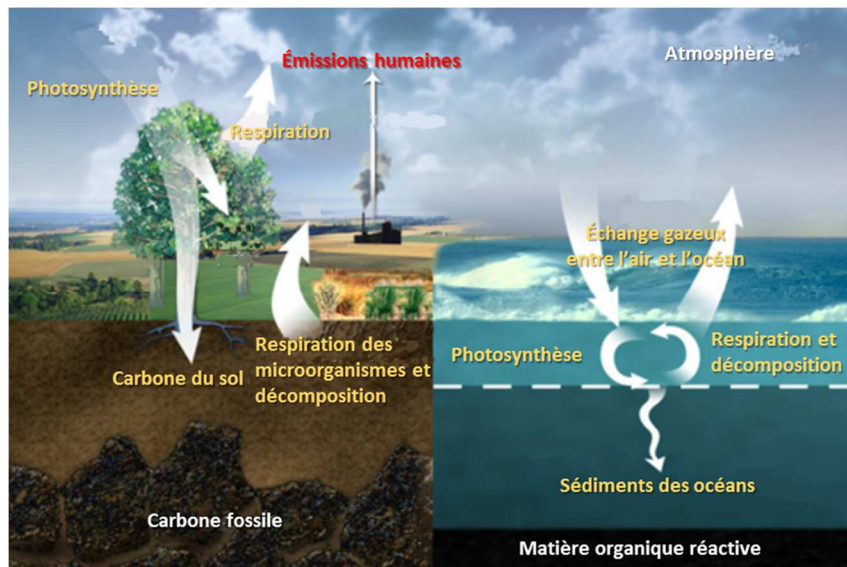


Figure 1. Le cycle du carbone¹¹

³ Apps et coll. (1999), Hennigar et coll. (2008), Smyth et coll. (2014).

⁴ SCF (2011) <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32574.pdf> (consulté le 17 septembre 2015).

⁵ <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/4/e41.asp> (consulté le 13 septembre 2015).

⁶ MFFP (2015a).

⁷ FAO (2015).

⁸ Environnement : changements climatiques – La FAO préconise une gestion durable des forêts. <http://casafree.com/modules/news/article.php?storyid=25746> (consulté le 13 septembre 2015).

⁹ Kurz (2008).

¹⁰ GIEC (2007).

¹¹ Adaptation de la NASA <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/> (consulté le 1^{er} juillet 2015).

Les effets de substitution peuvent être intégrés dans le bilan du carbone seulement si les produits du bois sont utilisés pour remplacer d'autres matériaux de construction (par exemple, le béton et l'acier) ou comme sources d'énergie au lieu des combustibles fossiles. Étant donné le cycle de vie des produits forestiers (figure 2), l'effet combiné de la substitution, de la séquestration et de la rétention vient donc accentuer les bénéfices environnementaux de l'utilisation du bois.

L'apport de la séquestration et du stockage du carbone par les écosystèmes forestiers dans la lutte contre les changements climatiques est reconnu depuis longtemps par les communautés scientifique et politique¹². Pour la période 2008-2012, le premier engagement du Protocole stipulait que le carbone retiré de l'écosystème forestier était considéré comme une émission directe dans l'atmosphère au moment même de la récolte. En réalité, la plupart des produits du bois récoltés et transformés maintiennent le carbone séquestré pendant longtemps (figure 3). Ils peuvent aussi en libérer par la décomposition jusqu'à la fin de leur vie utile ou par la combustion. Ainsi, le rôle joué par le carbone en rétention dans les produits du bois dans l'atténuation des gaz à effet de serre n'a été reconnu que récemment par le Protocole de Kyoto¹³. Par conséquent, les méthodes de comptabilisation du Protocole de Kyoto ont été officiellement modifiées pour inclure le transfert du carbone séquestré par l'écosystème dans le réservoir de carbone des produits du bois pour la période 2013-2020¹⁴.

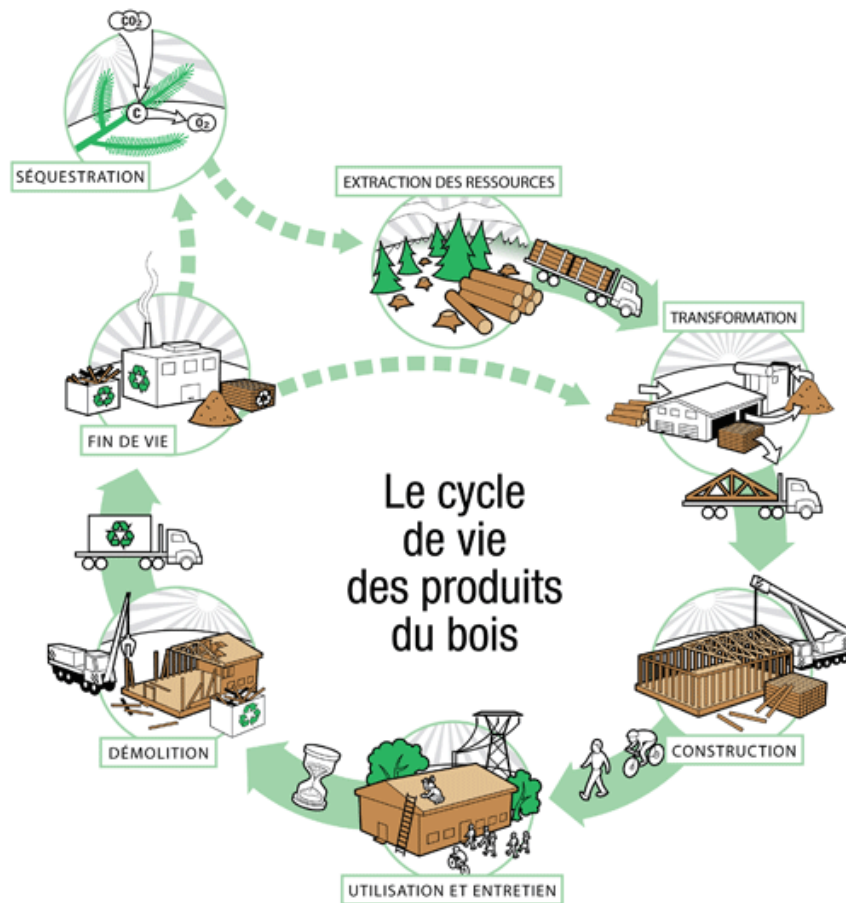


Figure 2. Le cycle de vie des produits du bois¹⁵

¹² IPCC (1997).

¹³ IPCC (2013).

¹⁴ IPCC (2013).

¹⁵ Source : CECOBOIS, tiré de <http://www.compensationco2.ca/planter-pour-compenser/> (consulté le 9 septembre 2015).

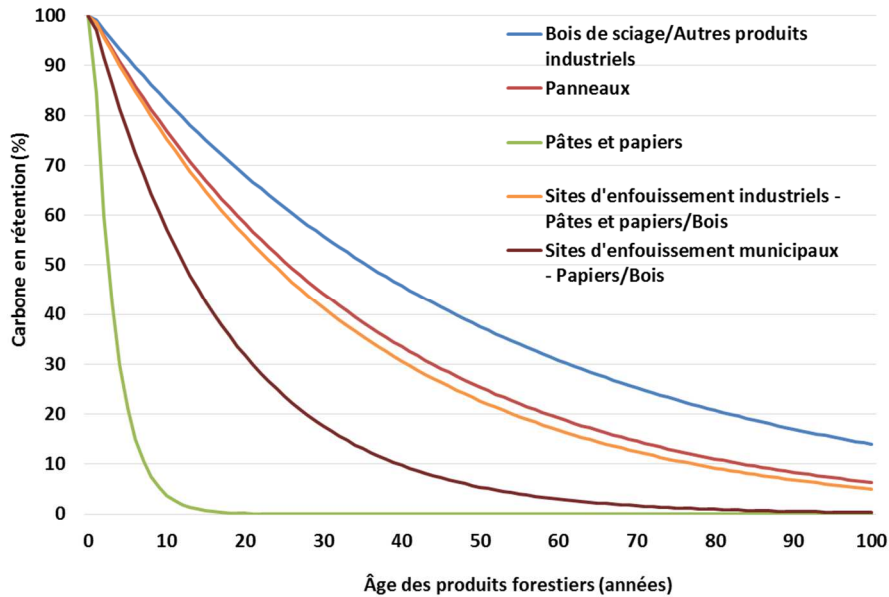


Figure 3. Courbes de rétention de carbone dans les produits du bois en utilisation (bois de sciage, autres produits industriels, panneaux, pâtes et papiers) et dans les sites d'enfouissement (industriels et municipaux) au Québec¹⁶.

Présentement, la quantification des échanges de stocks de carbone entre l'écosystème, les produits forestiers et l'atmosphère pour la forêt publique québécoise est peu documentée. Annuellement, le gouvernement du Canada publie un bilan de carbone des forêts dans son « National Inventory Report ». Ces résultats sont publiés par écozones ou pour l'ensemble du Canada. Les résultats pour le Québec y sont également disponibles. Toutefois, il existe peu d'information sur les méthodes de quantification pour le Québec avec des bases de données plus spécifiques. Par exemple, les analyses de cycle de vie des produits forestiers strictement pour le Québec restent peu documentées et sont nécessaires pour le suivi de carbone des produits forestiers à l'échelle provinciale. Le gouvernement du Québec a proposé une orientation officielle dans la Stratégie d'aménagement durable des forêts (SADF) pour intégrer le carbone forestier et la lutte contre les changements climatiques dans l'évaluation des possibilités forestières¹⁷.

Le Forestier en chef a donc entrepris le développement d'une méthode d'intégration et de suivi du carbone forestier. Dans cette perspective, un avis¹⁸ a permis de constater l'effet de stratégies d'aménagement sur les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers. Un nouveau développement méthodologique fait non seulement le bilan de carbone dans le réservoir de l'écosystème forestier, mais également dans les produits forestiers.

¹⁶ Les courbes de rétention présentées proviennent de valeurs moyennes basées sur l'historique de production et les prévisions futures pour la province du Québec. Communication personnelle avec Michael Magnan du Service canadien des forêts.

¹⁷ MFFP (2015b).

¹⁸ Bureau du forestier en chef (2015). <http://forestierenchef.gouv.qc.ca/actualite/le-forestier-en-chef-evalue-le-taux-de-carbone-sequestre-en-foret-amenagee/> (consulté le 13 septembre 2015).

Analyse de la situation

Quel est le bilan de carbone (émissions et séquestration) associé aux réservoirs de la partie marchande de l'arbre en croissance et dans les produits forestiers entre 2013 et 2038 ?

Description des régions

L'analyse porte sur 18 unités d'aménagement réparties dans les régions du Bas-Saint-Laurent (01), de l'Outaouais (07) et de la Côte-Nord (09). Elles ont été choisies à partir de leurs différences de composition, de structure d'âge et de stratégies d'aménagement¹⁹ (tableau 1 et figure 4).

Tableau 1. Superficie productive, structure d'âge, composition et stratégie d'aménagement des trois régions analysées²⁰

Régions	Superficie productive (ha) ²¹	Structure d'âge (%)		Composition du volume sur pied en 2008 ²²	Stratégie 2015-2018 ²³	
		Régénération ²⁴	Vieilles forêts ²⁵		Proportion de coupes partielles sur la superficie totale récoltée (%)	Proportion de coupes totales reboisées (%)
Bas-Saint-Laurent	927 650	19	23	Mixte à dominance résineuse	49	31
Outaouais	2 450 890	7	32	Mixte à dominance feuillue	51	22
Côte-Nord	6 409 240	16	54	Résineux	11	16
Total	9 787 780	14	45		31	19

Quantification du carbone

Les stratégies d'aménagement retenues pour la période 2015-2018 servent à prédire l'évolution future (2013-2038) du volume sur pied dans la forêt ainsi que le volume qui sera récolté entre 2013 et 2038. Par la suite, ces volumes sont convertis en carbone²⁶ pour en quantifier l'évolution dans le temps²⁷. L'horizon de 25 ans a été déterminé en fonction de limitations techniques liées aux méthodes de modélisation ayant servi à l'optimisation des stratégies d'aménagement 2015-2018.

La quantification du carbone est réalisée pour la partie marchande²⁸ de l'arbre en croissance dans le réservoir de la biomasse aérienne vivante. Les autres réservoirs de la biomasse aérienne et souterraine vivante (houppier, souche, feuille, écorce, racines), la biomasse morte et le carbone du sol ne sont pas évalués. De plus, le volume de bois récolté entre 2013 et 2038 constitue un réservoir extérieur dans lequel le volume transformé maintient le carbone séquestré à long terme, mais il en libère également (figure 3).

¹⁹ C'est-à-dire celles utilisées pour la détermination des possibilités forestières de la période 2015-2018.

²⁰ Source : Bureau du forestier en chef – Compilation interne.

²¹ La superficie productive représente la forêt publique où les activités d'aménagement sont permises et non permises mais incluses au Bilan.

²² La composition du volume sur pied est considérée résineuse lorsque 75 % et plus du volume est résineux, considérée feuillue lorsque 75 % et plus du volume est feuillu. Une composition mixte avec une dominance est plus faible que 75 % pour le groupe résineux ou feuillu.

²³ Ces valeurs sont basées sur les stratégies d'aménagement retenues par le Forestier en chef pour la période 2015-2018 et constituent une moyenne des résultats obtenus entre 2013 et 2038.

²⁴ La structure d'âge en « régénération » est caractérisée par la superficie ayant moins de 10 ans, moins de 15 ans et moins de 20 ans pour les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière respectivement.

²⁵ La structure d'âge « vieilles forêts » est caractérisée par la superficie ayant 100 ans et plus ou 23 m²/ha, 80 ans et plus ou 20 m²/ha et plus, et 100 ans et plus pour les domaines bioclimatiques de l'érablière, de la sapinière et de la pessière respectivement.

²⁶ La conversion est réalisée avec des modèles empiriques de conversion volume-biomasse du SCF (Boudewyn et coll. (2007) et communication personnelle avec Graham Stinson du SCF) et un facteur de conversion biomasse-carbone de 50 % (MFFP, 2015b).

²⁷ La rétention et les émissions historiques et futures de carbone dans les produits forestiers ainsi que les échanges entre les réservoirs de carbone sont estimés à l'aide du système « NFC-MARS », le *National Forest Carbon Monitoring, Accounting and Reporting System*. Kurz et Apps (2006), Stinson et coll. (2011).

²⁸ La partie marchande se définit comme étant le tronc et les branches sous écorce compris entre le diamètre à hauteur de souche et un diamètre d'utilisation de 9 cm avec écorce.

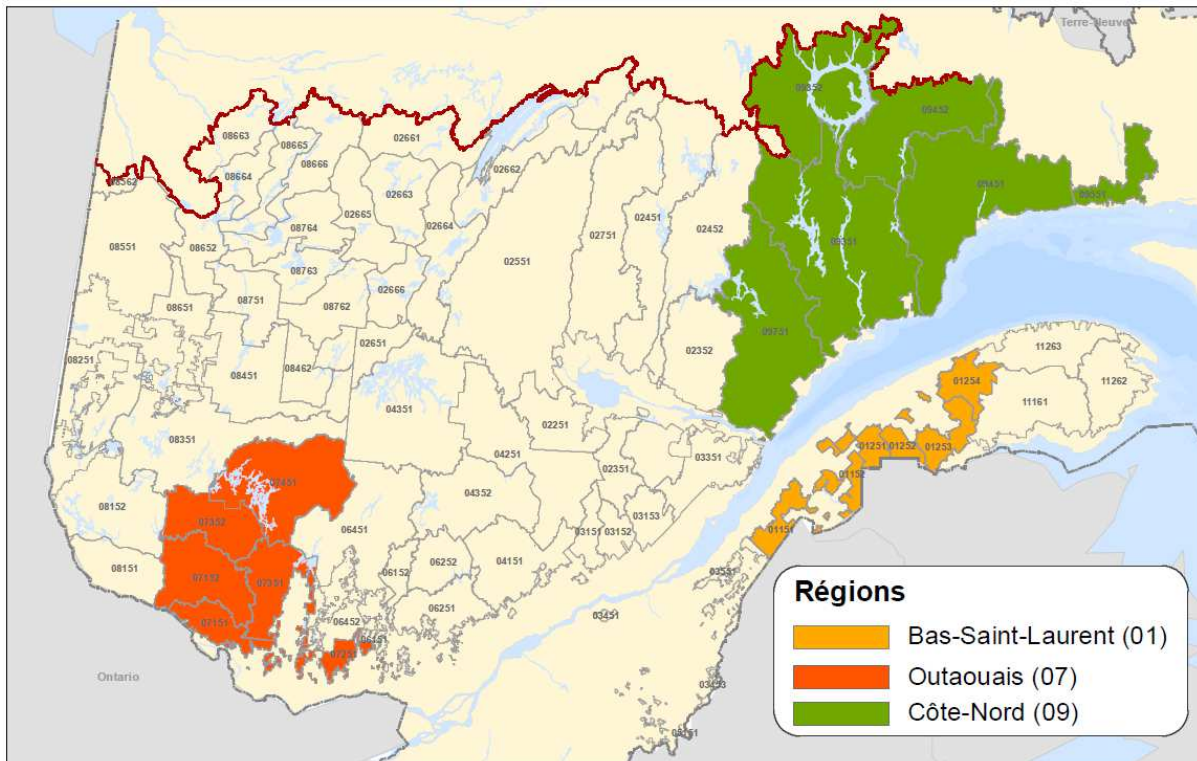


Figure 4. Localisation des 18 unités d'aménagement analysées dans les régions du Bas-Saint-Laurent, de l'Outaouais et de la Côte-Nord²⁹

Le tableau 2 explique le scénario évalué pour quantifier le carbone dans la partie marchande de l'arbre en croissance et dans les produits forestiers à partir de la forêt aménagée. Le bilan de ces deux réservoirs combinés est comparé à l'évolution théorique qu'aurait la forêt si elle ne subissait aucune perturbation (naturelle ou humaine). Sans égard aux perturbations naturelles, le potentiel de séquestration de carbone d'un territoire forestier varie principalement en fonction de la structure d'âge (Enjeu 2), de la composition (Enjeu 3) et des stratégies d'aménagement appliquées³⁰.

Tableau 2. Description des scénarios évalués et des méthodes de quantification du carbone

Scénarios	Description	Méthode de quantification du carbone
Forêt aménagée	Comprend l'intégralité de la stratégie d'aménagement retenue pour 2015-2018, les produits forestiers et aucune perturbation naturelle.	Les stocks de carbone sont comptabilisés à partir de la partie marchande de l'arbre en croissance et des produits forestiers. Les émissions de CO ₂ équivalent sont quantifiées pour les produits forestiers seulement.
Évolution naturelle	Évalue l'évolution théorique de la forêt sans activité d'aménagement ni perturbation naturelle.	Les stocks de carbone sont comptabilisés à partir de la partie marchande de l'arbre en croissance seulement. Le scénario suppose qu'il n'y a pas de récolte future.

²⁹ Source : Bureau du forestier en chef.

³⁰ Bureau du forestier en chef (2015).

Carbone de la partie marchande de l'arbre en croissance

Les vieilles forêts sont de grands réservoirs de carbone avec de faibles taux de croissance³¹. Elles ont atteint un stade de stockage ayant un équilibre dynamique³² et constituent des réservoirs pleins ayant perdu leur fonction de puits. Leur capacité de stockage de carbone est plus faible comparativement à la forêt aménagée en régénération, laquelle est considérée comme étant un puits de carbone en croissance. Parmi les trois régions, le Bas-Saint-Laurent est celle qui a le plus de forêt en régénération et le moins de vieilles forêts. Par conséquent, cette région est caractérisée par le plus grand renouvellement des stocks de carbone entre 2013 et 2038 (figure 5; graphique d).

Même si ce constat peut laisser croire qu'il faut remplacer les vieilles forêts par des jeunes et que l'analyse montre un portrait partiel considérant uniquement la partie marchande des tiges, ce dernier pourrait être fort différent pour certains écosystèmes qui accumulent du carbone dans les sols et les gros débris ligneux même s'ils sont vieux. Une étude de tous les réservoirs de carbone de la forêt, des produits forestiers et des effets de substitution sur une longue période pourrait permettre de distinguer l'effet de diverses stratégies d'aménagement sur le bilan de carbone d'une forêt.

Cependant, les autres réservoirs de carbone sont relativement stables (sans perturbations majeures) dans le temps et l'écosystème constitue un réservoir ayant une capacité maximale de stockage. Il est toutefois possible d'entreposer du carbone dans les produits forestiers et de contrôler la pérennité de leurs stocks de carbone dans le temps. Une vieille forêt est vulnérable face aux perturbations naturelles et dans ce cas, les stocks sont plus difficilement gérables dans le temps à cause de l'incertitude reliée à ces perturbations. Dans un cadre de gestion intégrée des ressources et du territoire par l'intermédiaire de l'optimisation de stratégies d'aménagement, les cibles de vieilles forêts sont respectées. De plus, des études³³ sont arrivées à la conclusion qu'utiliser la ressource plus efficacement dans un cadre d'aménagement durable dont l'objectif est de maintenir ou d'augmenter les stocks de carbone tout en maintenant une production de bois annuelle permet une plus grande atténuation des effets des changements climatiques³⁴.

L'influence de la composition de la forêt est également observable. Puisque la densité du bois est plus élevée pour les essences feuillues que les essences résineuses³⁵, la partie marchande des feuillus durs en croissance constitue un important réservoir de carbone³⁶. En 2013, les stocks de carbone sont d'environ 9, 24 et 30 tonnes par hectare pour les régions de la Côte-Nord, du Bas-Saint-Laurent et de l'Outaouais, respectivement (figure 5).

L'historique des perturbations et la stratégie d'aménagement ont également une influence sur l'évolution des stocks de carbone dans le temps. Par exemple, à la suite de l'épidémie de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE) entre 1968 et 1992, la région du Bas-Saint-Laurent a procédé au reboisement de plusieurs milliers d'hectares pour reconstituer la forêt rapidement en vue d'atténuer la baisse des possibilités forestières appréhendée. La stratégie 2015-2018 de cette région comporte 49 % des activités de récolte en coupe partielle et 31 % de coupes totales seront reboisées (tableau 1). La superficie en coupe partielle constitue un réservoir de carbone stable qui maintient la fonction de puits tout en entreposant régulièrement du carbone dans le réservoir des produits forestiers. L'aménagement plus intensif caractérisé par une stratégie de coupes totales suivies d'un reboisement permet l'entreposage immédiat d'une grande quantité de carbone dans les produits forestiers tout en générant des puits en croissance. Ces nouveaux puits étant reboisés avec des essences dont la croissance est plus rapide devraient permettre une récolte et un entreposage plus hâtifs des stocks de carbone dans les produits forestiers qu'une forêt sous aménagement extensif ou non aménagée³⁷. L'historique et la stratégie d'aménagement actuelle au Bas-Saint-Laurent combinés à la proportion élevée de forêt en régénération (puits), expliquent également le renouvellement important (17 %) des stocks de carbone à l'hectare pour la période de 25 ans évaluée (figure 5; graphique d). Sachant que l'écosystème forestier a une capacité maximale de stockage de carbone³⁸ et que les produits forestiers en permettent l'entreposage et la rétention à long terme, l'intensification de l'aménagement forestier crée des stocks additionnels³⁹ de carbone.

³¹ Ter-Mikaelian et coll. (2013).

³² La respiration est presque égale à la photosynthèse.

³³ Lemprière et coll. (2013); Smyth et coll. (2014).

³⁴ Ces conclusions sont en lien direct avec celles du chapitre 9 de quatrième rapport du GIEC.

³⁵ Richardson et coll. (2002).

³⁶ Malmshheimer et coll. (2008).

³⁷ SCF (2011) <http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32574.pdf> (consulté le 17 septembre 2015).

³⁸ Communication personnelle avec Werner Kurz du Service canadien des forêts.

³⁹ Afin qu'une quantité de carbone soit considérée additionnelle, elle doit être en surplus de la quantité usuelle produite par les pratiques courantes.

En général, les résultats peuvent varier d'une unité d'aménagement à l'autre en fonction des conditions locales, mais les tendances régionales sont apparentes. L'historique et la stratégie d'aménagement du Bas-Saint-Laurent reflètent une capacité de stockage de carbone plus grande sur l'horizon évalué, le réservoir de la partie marchande en croissance de l'Outaouais contient plus de carbone à l'hectare à cause de la forte proportion de feuillus durs et la Côte-Nord constitue un réservoir dont le stock de carbone est stable dans le temps (à moins de perturbations naturelles majeures telles que les feux ou les épidémies d'insectes) à cause de la proportion élevée de vieilles forêts et le faible taux d'aménagement. Plusieurs décennies sont toutefois nécessaires avant d'apercevoir le plein potentiel de l'effet des stratégies d'aménagement sur le stockage de carbone⁴⁰.

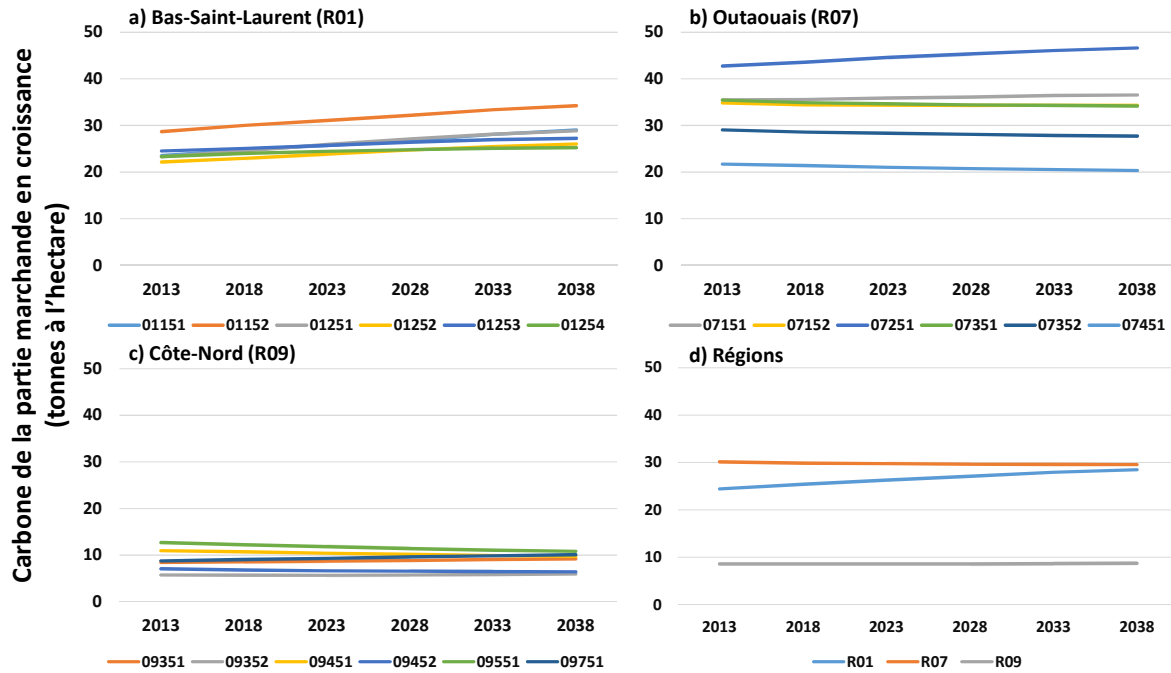


Figure 5. Évolution des stocks de carbone associés à la partie marchande en croissance selon le scénario *Forêt aménagée* pour les 18 unités d'aménagement entre 2013 et 2038⁴¹

Rétention et émission de carbone par les produits forestiers

Le tableau 3 présente les résultats de la rétention de carbone dans les produits forestiers sur un horizon de 25 ans, soit entre 2013 et 2038. La rétention de carbone en 2013 provient des produits transformés en 2013 et l'augmentation cumulative se poursuit jusqu'en 2038. Entre 2013 et 2038, la récolte des 18 unités d'aménagement retire un total de 31,3 Mt de carbone du réservoir de la partie marchande de l'arbre en croissance pour entrer dans le réservoir des produits forestiers. La rétention totale en 2038 pour les unités d'aménagement s'élève à 22,8 Mt, soit près de 73 % du carbone récolté sur 25 ans.

⁴⁰ Bureau du forestier en chef (2015).

⁴¹ Source : Bureau du forestier en chef – Compilation interne.

Tableau 3. Évolution du carbone en rétention (millions de tonnes (Mt)) dans les produits forestiers entre 2013 et 2038⁴²

Régions	Années					
	2013	2018	2023	2028	2033	2038
Bas-Saint-Laurent	0,2	1,1	1,9	2,7	3,4	4,0
Outaouais	0,5	3,0	5,4	7,7	9,8	11,5
Côte-Nord	0,3	2,0	3,5	4,9	6,3	7,3
Rétention totale	1,1	6,1	10,9	15,3	19,5	22,8

Les émissions annuelles de CO₂ équivalent⁴³ entre 2013 et 2038 proviennent également du cumulatif des produits transformés entre 2013 et 2038. En fait, ces émissions annuelles proviennent de la décomposition de l'ensemble des produits forestiers dans les sites d'enfouissement industriels et municipaux et de la combustion annuelle des résidus. Sachant que 73 % du carbone récolté sur l'horizon de 25 ans est toujours séquestré dans les produits forestiers, seulement 27 % de cette récolte a en effet été réémis dans l'atmosphère (tableau 4).

Tableau 4. Émissions annuelles de CO₂ équivalent (millions de tonnes (Mt)) à partir des produits forestiers entre 2013 et 2038⁴⁴

Régions	Années					
	2013	2018	2023	2028	2033	2038
Bas-Saint-Laurent	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Outaouais	0,4	0,8	1,1	1,5	1,8	2,1
Côte-Nord	0,3	0,5	0,7	1,0	1,2	1,3
Émissions totales	0,8	1,5	2,2	3,0	3,6	4,1

Carbone total séquestré dans les réservoirs de la partie marchande en croissance et des produits forestiers

Depuis 2013, la comptabilisation du carbone pour le secteur forestier inclut les échanges de stocks entre l'écosystème, les produits forestiers et l'atmosphère⁴⁵. Les résultats de la figure 6 montrent qu'il existe peu de différence entre le stockage de carbone du scénario *Évolution naturelle* comparativement au scénario *Forêt aménagée*. En considérant que l'horizon de 25 ans est relativement court, l'ajout des autres réservoirs de l'écosystème et des effets de substitution des produits forestiers aurait pu augmenter la quantité totale de carbone en rétention. Or, selon la littérature, une forêt aménagée génère le plus grand bénéfice en termes d'atténuation.

Les résultats montrent également que les stocks totaux de carbone varient grandement entre les régions mais principalement en fonction de leur superficie respective (tableau 1). Toutefois, les stratégies d'aménagement 2015-2018 modélisées sur 25 ans permettraient un renouvellement des stocks de carbone de l'ordre de 7,6 Mt pour le Bas-Saint-Laurent, de 7,6 Mt pour la Côte-Nord et de 9,4 Mt pour l'Outaouais. Le potentiel de stockage du Bas-Saint-Laurent sur 25 ans est égal à celui de la Côte-Nord mais sa superficie est presque sept fois plus petite. Le potentiel de stockage futur s'élève à plus de 24,6 Mt pour les 18 unités d'aménagement. Par conséquent, la région du Bas-Saint-Laurent a un potentiel de stockage équivalent à environ 31 % du potentiel total des trois régions avec seulement 9 % de la superficie totale analysée.

⁴² Source : Bureau du forestier en chef – Compilation interne.

⁴³ L'équivalence de CO₂ désigne le potentiel de réchauffement global d'un gaz à effet de serre calculé par équivalence avec une quantité de CO₂. La masse de CO₂ équivalent de la présente étude inclut le dioxyde de carbone, le méthane et les oxydes nitreux.

⁴⁴ Source : Bureau du forestier en chef – Compilation interne.

⁴⁵ La comptabilisation du carbone d'un territoire forestier sous aménagement s'inscrit dans l'optique du *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (LULUCF) et, par conséquent, exclut les émissions provenant de l'utilisation de combustibles fossiles et d'énergie pour l'aménagement et la récolte de la forêt, le transport des bois et la transformation des produits forestiers (GIEC, 2006), puisque ces émissions sont comptabilisées dans un autre secteur. De plus, les méthodes de comptabilisation du Protocole de Kyoto ont été officiellement modifiées pour inclure les échanges de stock de carbone des réservoirs de produits du bois pour la période 2013-2020 (IPCC, 2013).

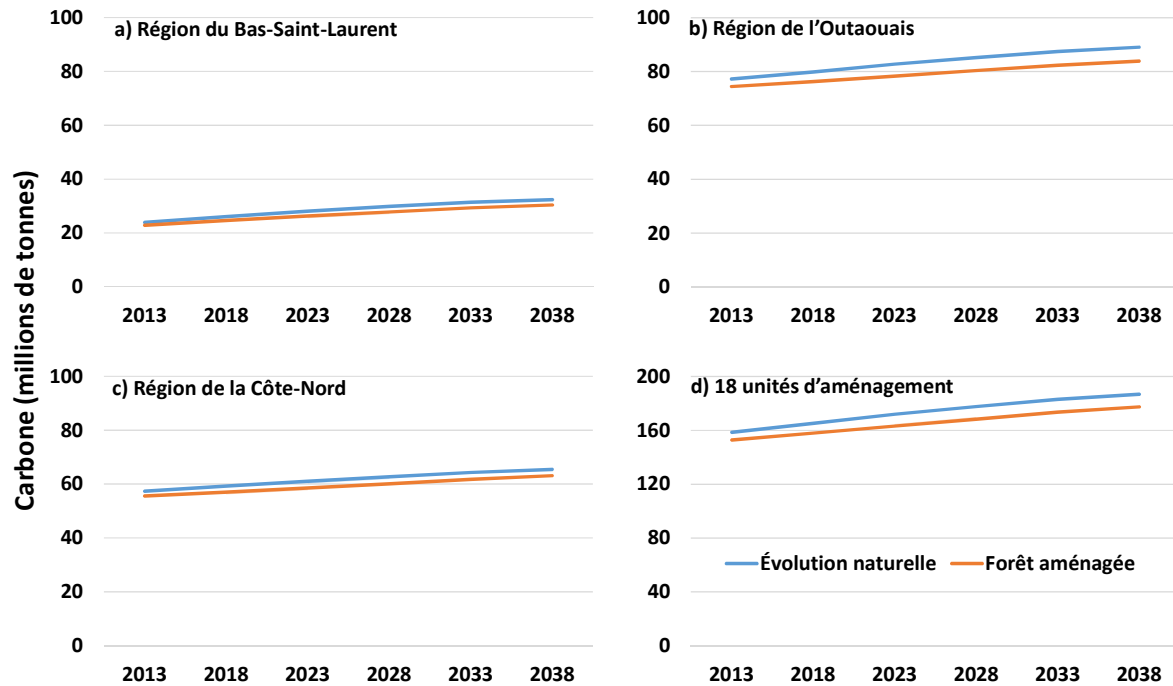


Figure 6. Évolution des stocks de carbone entre 2013 et 2038 pour les scénarios *Forêt aménagée* et *Évolution naturelle*⁴⁶

Dans l'ensemble des régions, le scénario *Évolution naturelle* montre une plus grande quantité de carbone séquestré. Toutefois, le carbone en rétention dans les produits forestiers en utilisation ou dans les sites d'enfouissement peut y rester pendant longtemps en fonction du type de produit et des transferts possibles entre les réservoirs⁴⁷. Il est estimé que 51 % du carbone pourrait encore être retenu dans ces réservoirs 100 ans après leur transformation⁴⁸. Par conséquent, il y a une sous-estimation des stocks de carbone dans le scénario *Forêt aménagée*. Le portrait présenté dans la figure 6 serait différent si les données historiques de récolte et de production antérieures à 2013 avaient été utilisées et si l'horizon de calcul avait été plus long.

Collaboration spéciale de l'équipe du Service canadien des forêts : Werner Kurz, Michael Magnan, Stephen Kull, Graham Stinson, Eric Nielson, Mark Hafer, Céline Boisvenue et Paul Boudewyn.

Constats pour la période 2013-2038

Les échanges de stocks de carbone entre les réservoirs de l'écosystème, les produits forestiers et l'atmosphère ont été peu étudiés au Québec. La quantification de ces échanges s'effectue selon un principe de vases communicants. Le principe est simple, lorsqu'un réservoir se vide, un autre se remplit. L'écosystème forestier a une capacité maximale de séquestration et de stockage, c'est pourquoi l'entreposage des stocks de carbone dans les produits forestiers par l'intermédiaire de l'aménagement forestier et de l'industrie forestière est essentiel pour évaluer la contribution du secteur forestier dans l'atténuation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le Forestier en chef a entrepris le développement d'une méthode d'intégration et de suivi du carbone dans l'écosystème et les produits forestiers.

La capacité de séquestration de carbone d'un territoire forestier varie principalement en fonction de l'historique des perturbations, de la structure d'âge, de la composition et des stratégies d'aménagement appliquées. En

⁴⁶ Source : Bureau du forestier en chef – Compilation interne.

⁴⁷ Kurz et Apps (2006); Stinson et coll. (2011).

⁴⁸ Communication personnelle avec Michael Magnan du Service canadien des forêts.

général, l'historique de perturbation et la stratégie d'aménagement plus intensive du Bas-Saint-Laurent permettent un renouvellement rapide des puits de carbone de l'écosystème tout en cumulant du carbone dans les produits forestiers. Le réservoir de la partie marchande en croissance de l'Outaouais contient plus de carbone à l'hectare à cause de la forte proportion de feuillus durs et sa stratégie d'aménagement principalement constituée de coupes partielles maintient la fonction de puits tout en entreposant régulièrement du carbone dans les produits forestiers. La Côte-Nord constitue un réservoir de carbone stable dans le temps à cause de la proportion élevée de vieilles forêts et le faible taux d'aménagement.

Entre 2013 et 2038, la récolte des 18 unités d'aménagement retire 31,3 Mt de carbone du réservoir de la partie marchande de l'arbre en croissance pour le transférer dans le réservoir des produits forestiers. La rétention cumulative totale en 2038 pour les unités d'aménagement devrait s'élever à plus de 22,8 Mt, soit près de 73 % du carbone récolté sur l'horizon de 25 ans. Par conséquent, seulement 27 % de cette récolte serait réémis dans l'atmosphère.

Globalement, les stratégies d'aménagement des 18 unités d'aménagement ont le potentiel de séquestrer 24,6 Mt de carbone (partie marchande de l'arbre en croissance et produits forestiers) sur un horizon de 25 ans. La région du Bas-Saint-Laurent aurait un potentiel de stockage équivalent à près de 31 % du potentiel total pour les trois régions avec seulement 9 % de la superficie analysée. Le carbone en rétention dans les produits forestiers en utilisation ou dans les sites d'enfouissement peut y rester pendant longtemps. Bien que le scénario *Évolution naturelle* montre une plus grande quantité de carbone séquestré, le résultat sous-estime les stocks de carbone séquestré dans le scénario *Forêt aménagée*. Le portrait serait différent si des données historiques de récolte et de production antérieures à 2013 avaient été utilisées et si l'horizon de calcul avait été plus long.



Crédit photo : MFFP

Actions gouvernementales en matière d'aménagement durable des forêts

Le gouvernement du Québec a entrepris, depuis 2008, un virage important afin d'encourager une plus grande utilisation du bois par l'adoption de mesures visant à :

- Utiliser une plus grande quantité de bois dans la construction. La Stratégie d'utilisation du bois dans les constructions non résidentielles et familiales au Québec⁴⁹ a été mise en œuvre en mai 2008. La Coalition BOIS Québec⁵⁰ a fait la campagne de sensibilisation « *Je touche du bois* » (Enjeu 16).
- Favoriser la mise en valeur de la biomasse forestière. Le plan d'action *Vers la valorisation de la biomasse forestière*⁵¹ a été dévoilé en février 2009 afin de valoriser les branches, les cimes et les bois sans preneur. Ce plan vise la réduction annuelle de 1,1 million de tonnes de GES d'ici 2016.

En 2010, dans son Avis sur la gestion durable de la forêt boréale⁵², le Forestier en chef retenait les propositions du GIEC⁵³ considérées comme des moyens de séquestrer davantage le carbone atmosphérique à partir de l'aménagement forestier :

- Maintenir ou augmenter la superficie forestière en diminuant la déforestation et la dégradation des écosystèmes forestiers, ainsi qu'en considérant l'afforestation et le reboisement.
- Maintenir ou augmenter la densité de carbone sur pied, en favorisant des aménagements forestiers plus intensifs (préparation de terrain, reboisement, fertilisation, sylviculture intensive, etc.).
- Maintenir ou augmenter la densité de carbone sur pied à une plus grande échelle, en mettant de l'avant des stratégies efficaces de lutte aux feux de forêt et aux épidémies d'insectes, tout en favorisant des territoires sous conservation pour le maintien de la diversité biologique.
- Augmenter le stockage de carbone en favorisant l'utilisation de produits du bois, dans le but de les substituer à des produits ayant des demandes énergétiques importantes en combustibles fossiles et favoriser les biocombustibles.

Dans le 5^e rapport du GIEC, des nuances sont soulevées quant au rôle des forêts dans la lutte contre les changements climatiques⁵⁴. D'un certain point de vue, strictement en rapport avec les écosystèmes forestiers, les changements climatiques auront potentiellement un impact sur la composition de la forêt et sa croissance. Toutefois, la gestion durable de la forêt dans l'optique d'un maintien ou d'une augmentation de carbone conjointement à l'utilisation efficace des produits du bois et de leur effet de substitution sont essentielles dans le calcul de l'apport du secteur forestier dans l'atténuation des changements climatiques. Ces mesures constituent ensemble le meilleur scénario d'atténuation malgré l'impact potentiel des changements climatiques sur les écosystèmes.

La mise en œuvre du système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (SPEDE) constitue un événement charnière dans l'approche stratégique du Québec en matière de changements climatiques (Enjeu 14) et d'aménagement durable des forêts. Le gouvernement du Québec a adhéré à la Western Climate Initiative⁵⁵ (WCI) en 2008 pour créer un mécanisme de marché en matière de carbone dans son économie. En 2009, il a déposé un projet de loi à l'Assemblée nationale pour se doter des pouvoirs nécessaires à la mise en œuvre d'un SPEDE⁵⁶ par voie réglementaire. En 2011, il a créé la WCI Inc. en partenariat avec la Californie, l'Ontario et la Colombie-Britannique, pour offrir des services administratifs et techniques en appui à l'application du SPEDE. La même année, il a également modifié le Règlement sur la déclaration obligatoire de certaines émissions de contaminants dans l'atmosphère afin de l'harmoniser aux règles de la WCI et finalement adopter le Règlement sur le SPEDE. Ce règlement a été modifié en 2012 dans l'objectif de permettre la liaison des marchés québécois à ceux de la Californie (officiel depuis 2014). Le SPEDE, lequel constitue l'une des mesures clés du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, est fonctionnel depuis 2013 et conforme en fonction de l'objectif de réduction de 20 % des émissions en 2020 par rapport aux émissions de 1990.

⁴⁹ http://www.cecobois.com/publications_documents/strategie-utilisation-du-bois.pdf (consulté le 16 septembre 2015).

⁵⁰ http://www.cecobois.com/index.php?option=com_content&view=article&id=235&Itemid=187 (consulté le 16 septembre 2015).

⁵¹ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/plan-action-biomasse.pdf> (consulté le 16 septembre 2015).

⁵² <http://forestierenchef.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/2012/12/fec-fic-avis-fb.pdf> (consulté le 16 septembre 2015).

⁵³ GIEC (2007).

⁵⁴ <http://mitigation2014.org/report/publication/> (consulté le 25 octobre 2015).

⁵⁵ <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/WCI.htm> (consulté le 3 novembre 2015).

⁵⁶ <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/changements/carbone/Systeme-plafonnement-droits-GES.htm> (consulté le 3 novembre 2015).

Le gouvernement du Québec a proposé une orientation officielle dans la Stratégie d'aménagement durable des forêts (SADF) pour intégrer le carbone forestier et la lutte contre les changements climatiques dans l'évaluation des possibilités forestières⁵⁷. Le Forestier en chef a donc entrepris de développer son expertise en comptabilisation du carbone forestier et a publié un avis sur le carbone⁵⁸ dans lequel il a émis des recommandations pour orienter la gestion du carbone forestier dans l'aménagement durable de la forêt.

Perspective future

Il faut continuer les efforts pour modéliser et comptabiliser les stocks de carbone séquestrés dans l'écosystème et leur rétention dans les produits forestiers. L'acquisition des connaissances sur le cycle de vie des produits forestiers au Québec (taux de rétention dans les produits en utilisation et dans les sites d'enfouissement et taux d'émissions provenant de la décomposition, de la production bioénergétique et de l'incinération des résidus) et leurs effets de substitution à d'autres produits de construction ou sources d'énergie est nécessaire pour produire un bilan qui représente la réalité.

Les résultats présentés portent sur 18 unités d'aménagement et le Forestier en chef a pour objectif de réaliser la quantification de l'ensemble des unités d'aménagement de la province. Cette quantification sera réalisée en concordance avec le cadre légal et réglementaire prévu pour la soumission des bilans de carbone provinciaux et nationaux.

La comptabilisation du carbone forestier devient une pièce importante dans les bilans nationaux qui font état de l'effort de lutte contre les changements climatiques. Plusieurs pays ont mis en œuvre des plans de lutte contre la déforestation (changement permanent de la vocation forestière en vocation agricole ou par l'urbanisation) afin de maintenir et d'augmenter leur potentiel de séquestration et de rétention de carbone à partir de la forêt. Cependant, puisqu'il n'y a pas de déforestation au Québec (outre les infrastructures), l'effort pour augmenter le potentiel de séquestration devrait se tourner vers l'afforestation, c'est-à-dire installer de nouvelles forêts où il n'y en a pas.



Crédit photo : Lise Guérin

⁵⁷ MFFP (2015a).

⁵⁸ Bureau du Forestier en chef (2015).

Pistes d'amélioration

Recommandations techniques

Les trois recommandations suivantes proviennent de l'avis sur le carbone⁵⁹.

1. Évaluer le potentiel des stratégies d'aménagement suivantes, afin d'augmenter la quantité de carbone dans les écosystèmes forestiers québécois :
 - l'utilisation des territoires improductifs – Ces territoires sont les landes, les brûlis non régénérés et toute autre superficie dépourvue d'un couvert forestier (comme les friches en zone agricole)⁶⁰. Cette analyse permettrait d'obtenir un meilleur portrait du potentiel de séquestration supplémentaire du territoire forestier du domaine de l'État et du territoire privé;
 - l'utilisation des coupes partielles – Les coupes partielles ont le potentiel d'améliorer le bilan de carbone. Une meilleure connaissance de leurs effets sur la dynamique du carbone s'avère nécessaire pour les écosystèmes forestiers québécois;
 - la sélection des essences – Il faudrait s'assurer de mettre les bonnes essences aux bons endroits, sélectionnées en fonction de leur potentiel de croissance et de leur adaptabilité aux changements climatiques.
2. Évaluer la pertinence d'établir des cibles afin d'augmenter la quantité de carbone dans la forêt aménagée et dans les produits forestiers. Ainsi, l'aménagement forestier pourrait contribuer à diminuer la concentration de gaz à effet de serre et de cette façon faciliter l'atteinte des cibles de réduction des gaz à effet de serre adoptées par le Québec;
3. Évaluer la pertinence économique et financière d'établir le cadre légal et réglementaire permettant aux secteurs forestiers privé et public de contribuer au marché du carbone québécois. Lorsqu'il sera disponible, il sera possible de réaliser des analyses supplémentaires afin de quantifier les crédits de carbone compensatoires générés.
 - Réaliser des analyses de cycle de vie pour les produits forestiers au Québec.
 - Créer un outil permettant le suivi de la rétention du carbone et des émissions de carbone provenant des produits forestiers au Québec⁶¹.
 - Profiter d'une meilleure utilisation des bois feuillus de trituration disponibles pour la production bioénergétique dans un principe de substitution.

Recommandation de gestion

- Continuer la mise en place de politiques favorisant l'utilisation du bois dans la construction incluant la mise en place de la Charte du bois.

Références

- Apps, M.J., W.A. Kurz, S.J. Beukema et J.S. Bhatti (1999). Carbon budget of the Canadian forest product sector. In: *Environmental Science & Policy* 2 (1999) p. 25-41.
- Birdsey, R. et Y. Pan (2015). Trends in management of the world's forests and impacts on carbon stocks. *Forest Ecology and Management*.
- Boudewyn, P., X. Song, S. Magnussen et M.D. Gillis (2007). Model-based, volume-to-biomass conversion for forested and vegetated land in Canada. *Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique. Information Report BC-X-411. Victoria (C.-B.), 124 p.*
- Bureau du forestier en chef (2015). Effet de la stratégie d'aménagement sur la quantité de carbone séquestré sur le territoire forestier québécois. FEC-AVIS-06-2015. Roberval (Qc), 18 p. + annexes.
- Dymond, C.C. (2012). Forest carbon in North America : annual storage and emissions from British Columbia's harvest, 1965-2065. *Carbon Balance and Management* 2012, 7:8. doi:10.1186/1750-0680-7-8 <http://www.cbmjournal.com/content/7/1/8> (consulté le 23 septembre 2015).
- FAO (2015). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Évaluation des ressources forestières mondiales 2015 – Comment les forêts de la planète changent-elles ? Rome, Italie <http://www.fao.org/3/a-i4793f.pdf> (consulté le 26 octobre 2015).

⁵⁹ Bureau du forestier en chef (2015).

⁶⁰ Des recherches sont en cours à la Direction de la recherche forestière du MFFP et à l'Université du Québec à Chicoutimi.

⁶¹ Par exemple, l'outil BC-HWPv1 (Dymond, 2012) créé par le gouvernement de la Colombie-Britannique conjointement avec le SCF <http://www.cbmjournal.com/content/7/1/8> (consulté le 19 septembre 2015).

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2006). Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. Volume 4, chapitre 12 http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/pdf/4_Volume4/V4_12_Ch12_HWP.pdf (consulté le 23 septembre 2015).
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques*. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Équipe de rédaction principale, Pachauri, R. K. et A. Reisinger), GIEC, Genève, Suisse, 103 p.
- Hennigar, C., D. MacLean et L. Amos-Binks. (2008). A novel approach to optimize management strategies for carbon stored in both forests and wood products. *Forest Ecol. Manag.*, 256, 786–797.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (1997). Revised IPCC 1996 guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 3. Greenhouse gas inventory reference manual, Ch. 6. Waste. IPCC. Bracknell, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, Japan http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/pdf/KP_Supplement_Entire_Report.pdf (consulté le 23 septembre 2015).
- Kurz, W.A. et M.J. Apps (2006). Developing Canada's national forest carbon monitoring, accounting and reporting system to meet the reporting requirements of the Kyoto Protocol. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 11(1) : 33-43.
- Kurz, W. A. (2008). *Can Canada's forests contribute to a climate change mitigation strategy ?* University of Victoria, Canadian Institute of Forestry, May 1st, 2008.
- Lemprière, T.C., W.A. Kurz, E.H. Hogg, C. Schmoll, G.J. Rampley, D. Yemshanov, D.W. McKenney, R. Gilsean, J.S. Bhatti, A. Beach, et E. Krmar (2013). Canadian boreal forests and climate change mitigation. *Environ. Rev.* This issue. doi:10.1139/er-2013-0039.
- Malmsheimer, R.W., P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, C. Galik, E. Gee, J.A. Helms, N. McClure, M. Mortimer, S. Ruddell, M. Smith et J. Stewart (2008). Forest Management Solutions for Mitigating Climate Change in the United States. *Journal of Forestry*, avril-mai : 117-171.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2015a). Critères et indicateurs d'aménagement durable des forêts <http://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/4/c4.asp> (consulté le 9 juillet 2015).
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (2015b). Stratégie d'aménagement durable des forêts – Proposition de consultation publique <http://consultation-adf.mrn.gouv.qc.ca/pdf/SADF-proposition.pdf> (consulté le 9 juillet 2015).
- Richardson, J., R. Björheden, P. Hakkila, A.T. Lowe et C.T. Smith (2002). *Bioenergy from Sustainable Forestry : Guiding Principles and Practice*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 344 p.
- Service canadien des forêts (SCF) (2011). Points saillants sur la science. Comment les produits forestiers pourraient-ils contribuer à atténuer les changements climatiques ? Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Administration centrale, Ottawa. 2 p.
- Smyth, C. E., G. Stinson, E. Neilson, T. C. Lemprière, M. Hafer, G. J. Rampley et W. A. Kurz (2014). Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences*, 11, 3515-3529, doi:10.5194/bg-11-3515-2014.
- Stinson, G.; W.A. Kurz; C.E. Smyth; E.T. Neilson; C.C. Dymond; J.M. Metsaranta; C. Boisvenue; G.J. Rampley; Q. Li; T.M. White et D. Blain (2011). An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology* 17: 2227–2244, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x.
- Ter-Mikaelian, M.T., S.J. Colombo et J. Chen (2013). Effects of harvesting on spatial and temporal diversity of carbon stocks in a boreal forest landscape. *Ecology and Evolution*, 3(11) : 3738-3750.