

RAPPORT

GROUPE DE TRAVAIL SUR LA FORÊT ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (GTFCC)

PARTENAIRES FINANCIERS



Robert Beauregard – Université Laval
Patrick Lavoie – FPIInnovations
Évelyne Thiffault – Université Laval
Isabelle Ménard – Université Laval
Lucas Moreau – Université Laval
Jean-François Boucher – Université du Québec à Chicoutimi
François Robichaud – Forest Economic Advisors (FEA)

Le 15 novembre 2019

NOTE AUX LECTEURS

Ce rapport présente un exercice de modélisation du potentiel d'atténuation des changements climatiques via le secteur forestier québécois. L'exercice est basé sur le *Modèle du bilan de carbone du secteur forestier canadien* (CBM-CFS3) ainsi que sur des analyses complémentaires effectuées selon les approches propres aux modules sur les produits du bois et les coûts financiers. Il ne s'agit pas d'un modèle d'optimisation, mais plutôt d'un outil pour étudier la dynamique du carbone forestier de la forêt jusqu'aux marchés.

Les résultats de cet exercice ne sont ni des prévisions, ni des plans d'action; ils permettent plutôt d'évaluer des tendances pour aider la prise de décision. Il faut souligner que comme tout exercice de modélisation, celui présenté ici contient des incertitudes quant aux hypothèses et aux résultats, notamment en raison de l'exclusion de certaines variables; ces incertitudes et les limites de l'exercice sont discutés dans le rapport (voir section : Limites et autres considérations). Ces limites et incertitudes doivent être prises en compte dans l'interprétation des recommandations.

Le contenu de ce rapport, incluant les recommandations, reflète uniquement l'opinion des auteurs, réunis dans le Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques (GTFCC). Il n'engage en rien les individus, ministères et organismes ayant contribué aux travaux du GTFCC.

Le GTFCC tient à souligner le rôle conseil du Comité scientifique et technique (voir liste des membres en annexe) qui a contribué de manière significative à alimenter la réflexion tout au long de la réalisation du présent mandat.

TABLE DES MATIÈRES

NOTE AUX LECTEURS	I
COMMENT LE SECTEUR FORESTIER PEUT-IL CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES?	1
DESCRIPTION DU MANDAT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LA FORÊT ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	4
SCÉNARIOS D'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES PAR LE SECTEUR FORESTIER QUÉBÉCOIS	5
1- INTENSIFICATION DE L'AMÉNAGEMENT (INT)	7
2- DÉVELOPPEMENT DE LA BIOÉNERGIE (BIO)	7
3- INTENSIFICATION DE L'AMÉNAGEMENT ET DÉVELOPPEMENT DE LA BIOÉNERGIE (INT+BIO)	8
4- INTENSIFICATION DE L'AMÉNAGEMENT ET DÉVELOPPEMENT DE LA BIOÉNERGIE INCLUANT LA RÉCOLTE DES BOIS SANS PRENEURS (INT+BIO+RBSP)	9
MÉTHODOLOGIE POUR LA MODÉLISATION DU POTENTIEL D'ATTÉNUATION ET DES IMPACTS FINANCIERS ET ÉCONOMIQUES.....	13
POTENTIEL D'ATTÉNUATION	13
<i>Forêts.....</i>	13
<i>Produits du bois.....</i>	14
Analyse de sensibilité : transition industrielle accélérée	15
<i>Substitution sur les marchés.....</i>	15
Analyse de sensibilité : substitution ciblée sur les marchés	16
IMPACTS FINANCIERS ET ÉCONOMIQUES.....	16
<i>Approche financière</i>	16
<i>Approche économique.....</i>	17
RÉSULTATS	18
POTENTIEL D'ATTÉNUATION DES FLUX DE GES	18
<i>Analyse de base.....</i>	18
<i>Analyses de sensibilité.....</i>	22
ENCADRÉ 1 : QUE SE PASSE-T-IL LORS DE LA RÉCOLTE?	25
ENCADRÉ 2 : COMMENT LA PRODUCTION DE BIOÉNERGIE PEUT-ELLE CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION?.....	28
ENCADRÉ 3 : IMPACTS CLIMATIQUES DES ATTÉNUATIONS LIÉES AU SECTEUR FORESTIER.....	32
IMPACTS FINANCIERS ET ÉCONOMIQUES.....	35
<i>Développement de la bioénergie (BIO).....</i>	37
<i>Intensification de l'aménagement (INT).....</i>	37
<i>Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie (INT+BIO)</i>	38
<i>Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP)</i>	38
<i>Conclusion</i>	38
LIMITES DE L'ÉTUDE ET AUTRES CONSIDÉRATIONS.....	39
ÉQUIVALENCE DES MÉCANISMES DE SÉQUESTRATION ET DE RÉDUCTION	39
EFFET DE SUBSTITUTION	39
INVENTAIRE QUÉBÉCOIS DES GES.....	40
DYNAMIQUE DU CARBONE EN FORÊT.....	41
PERTURBATIONS NATURELLES.....	41
EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA COMPOSITION DES FORÊTS.....	43
LA COUPE PARTIELLE COMME PRATIQUE D'AMÉNAGEMENT	43
BIOÉNERGIE AVEC CAPTATION ET STOCKAGE DU CO ₂	43

RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS	44
DÉVELOPPEMENT DE LA BIOÉNERGIE	44
INTENSIFICATION DE L'AMÉNAGEMENT	44
<i>Boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers</i>	<i>45</i>
<i>Récolte de bois marchand, reboisement après coupe et production de bois de sciage</i>	<i>45</i>
MISE EN VALEUR DES BOIS SANS PRENEURS	45
SUBSTITUTION SUR LES MARCHÉS	45
ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES.....	46
PRIORITÉS D' ACTIONS	47
1. <i>Augmentation du rendement et de l'utilisation en produits de longue durée.....</i>	<i>47</i>
2. <i>Développement de chaines d'approvisionnement en biomasse forestière et de production de bioénergie</i>	<i>47</i>
3. <i>Récolte et mise en valeur des bois sans preneurs.....</i>	<i>47</i>
4. <i>Boisement/reboisement de sites improductifs et non-forestiers.....</i>	<i>48</i>
RÉFÉRENCES	49
ANNEXE : COMITÉ SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE	52

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Contribution du secteur forestier à la lutte aux changements climatiques (adapté de [2])	2
Figure 2.	Atténuation potentielle des émissions de GES	5
Figure 3.	Scénario Intensification de l'aménagement (INT)	7
Figure 4.	Scénario Développement de la bioénergie (BIO)	7
Figure 5.	Scénario Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie (INT+BIO)	8
Figure 6.	Scénario Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie incluant la Récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP)	9
Figure 7.	Différence de flux annuels de GES entre les quatre scénarios étudiés et le cours normal des affaires	20
Figure 8.	Flux annuels nets de GES des scénarios étudiés, par rapport au cours normal des affaires	20
Figure 9.	Flux cumulatifs nets de GES des scénarios étudiés, par rapport au cours normal des affaires	21
Figure 10.	Flux annuels nets de GES des scénarios étudiés, incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée, par rapport au cours normal des affaires	23
Figure 11.	Flux cumulatifs nets de GES des scénarios étudiés, incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée, par rapport au Cours normal des affaires	23
Figure 12.	Stocks de carbone en forêt suite à la coupe de 1 hectare de sapinière à bouleau blanc	25
Figure 13.	Flux annuels suivant la coupe de 1 hectare supplémentaire de sapinière à bouleau blanc	26
Figure 14.	Flux lors de la coupe de 1 hectare supplémentaire de sapinière à bouleau blanc	27
Figure 15.	Flux annuels dus aux débris suite à la coupe, sans (cours normal des affaires) et avec récupération des résidus de coupe, pour 1 hectare de sapinière à bouleau blanc	28
Figure 16.	Différence de flux annuels de GES en forêt entre la récupération de résidus de coupe et le Cours normal des affaires, pour 1 hectare de sapinière à bouleau blanc	29
Figure 17.	Différence de flux annuels de GES entre le scénario Développement de la bioénergie (BIO) et le cours normal des affaires, en fonction de la source d'énergie fossile substituée	30
Figure 18.	Bilan total de la différence de flux annuels de GES entre le scénario Développement de la bioénergie (BIO) et le cours normal des affaires, en fonction de la source d'énergie fossile substituée	31
Figure 19.	Différence de forçage radiatif annuel entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m ²	33
Figure 20.	Différence de forçage radiatif cumulatif entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m ²	34
Figure 21.	Potentiel, coûts d'atténuation moyens et coûts d'aménagement forestier des scénarios de base et des analyses de sensibilité pour la période 2020-2089	36
Figure 22.	Flux de GES provenant des forêts influencées par les perturbations naturelles seulement	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Activités du cours normal des affaires (CNA)	6
Tableau 2.	Description des scénarios d'atténuation	11
Tableau 3.	Différence de forçage radiatif cumulatif entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base, et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m ²	32
Tableau 4.	Résumé des analyses du potentiel d'atténuation des scénarios étudiés, incluant les analyses de sensibilité, de l'analyse financière et de l'analyse économique	35
Tableau 5.	Atténuations annuelles par rapport au cours normal des affaires captées dans l'inventaire québécois de GES	41

COMMENT LE SECTEUR FORESTIER PEUT-IL CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES?

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont le principal contributeur au phénomène des changements climatiques. L'augmentation de la concentration de GES dans l'atmosphère est principalement due à l'utilisation des énergies fossiles et, dans une moindre mesure aux changements d'affectation des terres, notamment à la déforestation dans les pays tropicaux.

La concentration de GES dans l'atmosphère peut être réduite par des stratégies visant à réduire les émissions et à activer la séquestration de GES. Les actions supplémentaires de réduction et de séquestration, par rapport au cours normal des affaires, contribuent à l'atténuation des changements climatiques.

Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), relevant du Programme des Nations Unies pour l'environnement et de l'Organisation météorologique mondiale, énonce que les solutions liées à l'utilisation des terres, notamment la foresterie, peuvent jouer un rôle clé en matière d'atténuation [1]. Le GIEC identifie différentes approches d'atténuation des changements climatiques liées à la foresterie, tout en soulignant la nécessité de leur harmonisation avec les mesures d'adaptation. Parmi les solutions présentant un potentiel élevé, le GIEC identifie les pratiques de foresterie suivantes [2] :

- 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 et l'exploitation forestière durable (gestion, récolte, régénération des superficies forestières aménagées et production de produits forestiers ligneux);
- l'utilisation des produits du bois et de la biomasse forestière en substitution de produits à forte intensité d'émissions de GES.

Rappelons que la croissance des arbres se fait grâce à la photosynthèse; le rayonnement solaire permet de fixer le CO₂ atmosphérique (le principal GES) pour faire croître la végétation forestière. En forêt, ce CO₂ fixé par les arbres est séquestré dans les tissus sous forme de carbone biogénique. La photosynthèse se poursuit jusqu'au dépérissement ou la mort naturelle de l'arbre, celui-ci étant remplacé généralement par des nouveaux semis. Augmenter les superficies forestières et augmenter la productivité des forêts existantes contribuent ainsi à augmenter la séquestration nette de GES et le réservoir de carbone stocké sur les terres.

Les arbres peuvent aussi être récoltés pour en faire des produits du bois. Le bois est une ressource renouvelable lorsque la forêt est aménagée de manière durable, c'est-à-dire en s'assurant de maintenir la pérennité des écosystèmes forestiers. L'utilisation de produits du bois minimise la quantité de GES émis à l'atmosphère de trois façons. Tout d'abord, la récolte et la transformation du bois nécessitent moins d'énergie issue des combustibles fossiles que la fabrication d'autres matériaux comme l'acier et le ciment. 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. Finalement, 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.

La contribution du secteur forestier à la réduction de la concentration de GES dans l'atmosphère et à la lutte aux changements climatiques est résumée à la Figure 1.

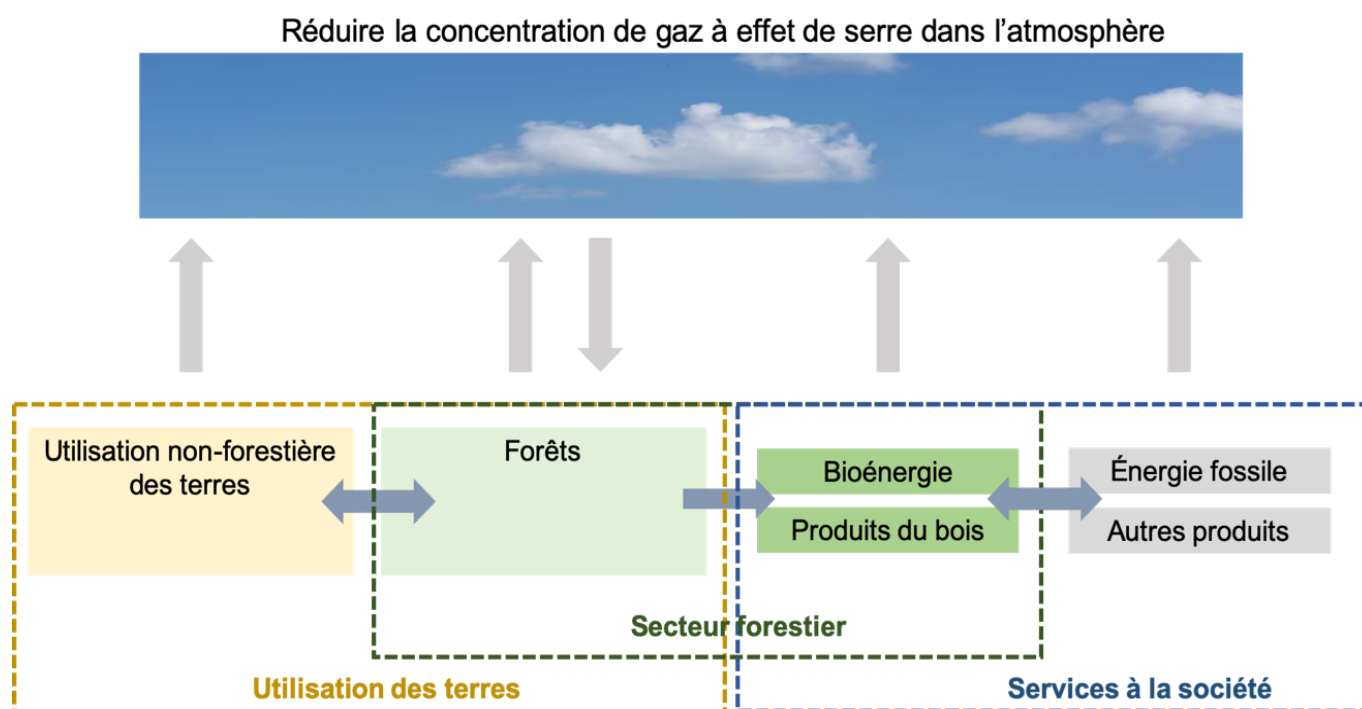


Figure 1. Contribution du secteur forestier à la lutte aux changements climatiques (adapté de [2])

Le Québec assure un leadership reconnu en matière de lutte aux changements climatiques, tant au plan national qu'international. Il s'est doté de cibles et d'objectifs ambitieux de réduction d'émissions de GES, soit une cible de 37,5 % sous le niveau de 1990 d'ici 2030 et un objectif de 80 à 95 % sous le niveau de 1990 d'ici 2050, ce qui exigera des efforts considérables et une transformation de l'économie québécoise.

Le Plan d'action sur les changements climatiques sur l'horizon 2020 (PACC 2013-2020) mise essentiellement sur la réduction des émissions des principaux secteurs émetteurs de GES, soit le transport, l'industrie et les bâtiments (chauffage et climatisation). Les actions de réduction des émissions québécoises du PACC 2013-2020 relevant du secteur forestier sont les suivantes¹ :

- la substitution par la biomasse forestière résiduelle des combustibles fossiles dans les secteurs de l'industrie et des bâtiments;
- la diminution de l'empreinte carbone des bâtiments par une plus grande utilisation du bois en construction (effet de substitution de matériaux à plus forte intensité d'émissions de GES, tels que le béton et l'acier) par des mesures telles que des modifications au code du bâtiment, de la formation, de la R&D, le développement de calculateurs et d'outils, et des appuis à la réalisation de projets-pilotes;
- le boisement et reboisement et autres travaux sylvicoles pour accroître la séquestration du carbone en forêt.

De plus, un protocole de crédits compensatoires lié au boisement et reboisement en forêt privée est actuellement en développement dans le cadre du Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE) de GES (marché du carbone réglementé).

Une approche intégrée, misant sur la synergie entre des actions d'aménagement forestier et les bénéfices de stockage dans les produits forestiers de longue durée et de la substitution sur les marchés, pourrait permettre au secteur forestier de contribuer de façon significative à la lutte aux changements climatiques au cours des prochaines décennies. Au moment où la planification des interventions en matière de changements climatiques

¹ <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/tableau-repartition-financement-PACC.pdf>

et de foresterie post 2020 est en cours, il convient de considérer de façon systémique la contribution potentielle du secteur forestier québécois à la lutte aux changements climatiques. Le présent rapport vise le développement et l'application d'une approche robuste de modélisation dans le but d'identifier les éléments de politique forestière et industrielle facilitant la mise en œuvre de cette contribution.

DESCRIPTION DU MANDAT DU GROUPE DE TRAVAIL SUR LA FORÊT ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques a été mandaté par le gouvernement du Québec pour évaluer la contribution que pourrait avoir **le secteur forestier comme acteur clé dans les stratégies et les plans d'action relatifs à la lutte contre les changements climatiques du Québec sur les horizons 2030 et 2050, dans un contexte d'aménagement forestier durable**. Les activités du Groupe de travail ont été encadrées par un Comité scientifique et technique, qui a joué un rôle consultatif. La liste complète des membres du Comité scientifique et technique est incluse en annexe.

Le mandat du Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques inclut les activités suivantes :

- Développer une approche robuste de modélisation pour évaluer, de façon intégrée, le rôle de l'aménagement forestier et des produits forestiers pour augmenter le stockage net du carbone et limiter les émissions de GES. Cette approche repose sur les outils de modélisation développés par le Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada. Ces outils basés sur la science sont largement utilisés au Canada et dans le monde; ils répondent aux standards internationaux en matière de comptabilisation du carbone forestier et ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques;
- Proposer des orientations et mesures qui pourraient s'inscrire dans des stratégies et plans relatifs au secteur forestier et à la lutte aux changements climatiques aux horizons 2030 et 2050;
- Identifier les actions à prioriser dans des stratégies et plans d'action relatifs au secteur forestier et à la lutte aux changements climatiques.

SCÉNARIOS D'ATTÉNUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES PAR LE SECTEUR FORESTIER QUÉBÉCOIS

Pour les besoins de ce mandat, quatre grands scénarios d'atténuation regroupant un ensemble d'actions ont été définis par le Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques, en concertation avec le Comité scientifique et technique (voir annexe pour la liste des membres). Il est à noter que toutes les actions doivent s'inscrire dans le respect des principes d'aménagement forestier durable et des objectifs d'aménagement écosystémique, au cœur du régime forestier au Québec. Cela inclut la préservation de la biodiversité, par exemple la protection de vieilles forêts et autres sites à haute valeur de biodiversité sur les territoires.

Ces quatre scénarios sont comparés au scénario du cours normal des affaires, en vue d'évaluer leur potentiel en termes d'atténuation des flux de GES à l'atmosphère.

L'atténuation potentielle des émissions de GES comprend la somme de trois effets (Figure 2) :

- la **séquestration** du carbone dans les forêts;
- le **stockage** de carbone dans les produits du bois, et
- la réduction des émissions vers l'atmosphère grâce à la **substitution**, par les produits du bois, de matériaux et d'énergie à forte intensité d'émissions de GES présents sur les marchés.



Figure 2. Atténuation potentielle des émissions de GES

Le scénario du cours normal des affaires est un scénario sans politique additionnelle, qui est basé sur un développement technologique futur aligné sur les tendances passées [3]. Ce scénario n'est pas une prédiction ni une prévision, mais plutôt le prolongement de la situation et des tendances actuelles.

Les activités du cours normal des affaires sont présentées au Tableau 1. Elles ont été définies à partir des données du Rapport d'inventaire national 2018 du Canada, préparé par le gouvernement canadien dans le cadre de ses obligations envers la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, ainsi que des informations statistiques fournies par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Tableau 1. Activités du cours normal des affaires (CNA)

Activités	Cours normal des affaires
Boisement /reboisement de sites improductifs/non-forestiers	Aucune activité de boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers.
Reboisement de superficies récoltées par coupe totale par la plantation de semis	Superficie reboisée de 56 000 ha/an de 2020 à 2089.
Récolte de bois marchand	Augmentation progressive de la récolte de 31 à 34 Mm ³ /an entre 2020 et 2089. 2020-2030 : 31 Mm ³ /an 2031-2050 : 32 Mm ³ /an 2051-2089 : 34 Mm ³ /an
Récupération des résidus de coupe totale sous forme de branches et de houppiers	Récupération variant entre 200 000 à 296 000 tma/an entre 2020 et 2089. La biomasse est principalement destinée à la production de chaleur. 2020-2030 : 211 000 tma/an 2031-2050 : 259 000 tma/an 2051-2089 : 296 000 tma/an
Éclaircie commerciale	Augmentation progressive de 6 000 à 8 500 ha/an entre 2020 et 2089. 2020-2030 : 6 400 ha/an 2031-2050 : 7 800 ha/an 2051-2089 : 8 500 ha/an
Production et rendement en produits de longue durée	84 % des volumes de bois marchand récoltés sont destinés à l'industrie du sciage. Le rendement en produits de longue durée dans les scieries est de 48 %. Ces valeurs restent constantes de 2020 à 2089.
Substitution	Aucune substitution. L'empreinte carbone des matériaux est constante de 2020-2089.

Note : Les valeurs présentées pour les intervalles de temps (p. ex. 2051-2089) sont la moyenne pour les années visées.

La comparaison des scénarios est faite aux horizons 2030 et 2050; une estimation à plus long terme (au-delà de 2050) est également réalisée. En raison des limites techniques des modèles utilisés, 2089 a été sélectionnée comme dernière année de simulation.

Les quatre scénarios d'atténuation comprennent chacun une combinaison d'actions visant une augmentation des activités d'aménagement forestier, de récolte de bois marchand et de récupération de biomasse pour la bioénergie, ainsi qu'une augmentation de la production de produits du bois de longue durée et/ou de bioénergie. Ces actions viennent s'ajouter aux activités du cours normal des affaires (présentée au Tableau 1). Le déploiement des actions des scénarios d'atténuation débute à l'année 2020 et se poursuit jusqu'en 2089 (dernière année de simulation).

Les quatre scénarios sont les suivants (les acronymes des scénarios seront utilisés dans le reste du texte) :

1- Intensification de l'aménagement (INT)

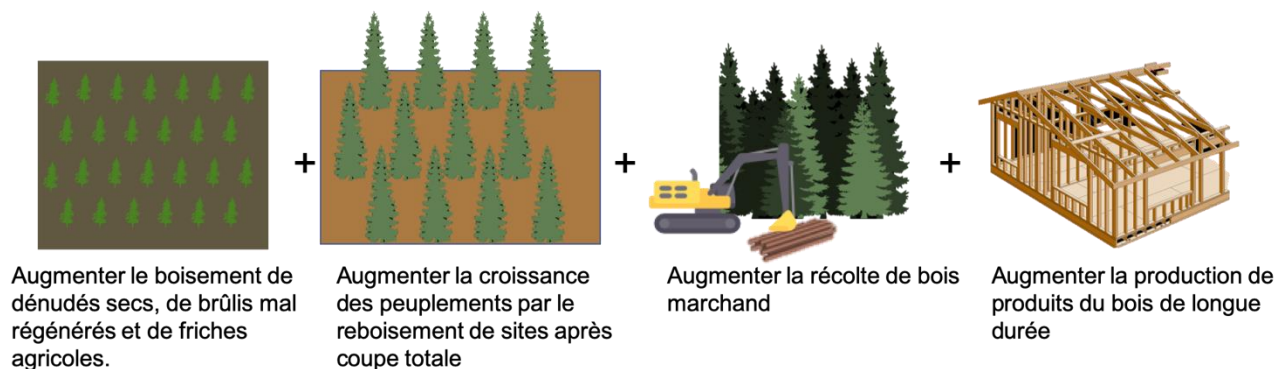


Figure 3. Scénario Intensification de l'aménagement (INT)

Ce scénario vise :

- une augmentation de la superficie de forêts sous aménagement, de la productivité forestière et de la production de bois marchand, en respect des limites de la possibilité forestière annuelle de coupe et des objectifs d'aménagement écosystémique;
- une augmentation de la proportion de produits de longue durée issus du bois marchand récolté.

2- Développement de la bioénergie (BIO)

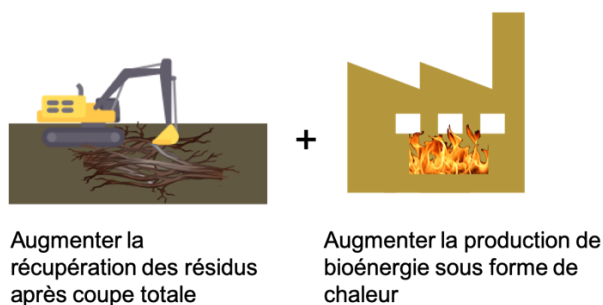


Figure 4. Scénario Développement de la bioénergie (BIO)

Ce scénario vise :

- une augmentation de la récolte de biomasse forestière pour la production de bioénergie, provenant de la récupération des résidus de coupe totale, en respect de la productivité des sols et de la biodiversité;
- une augmentation de l'utilisation de biomasse pour la production de chaleur considérant des actions non-ciblées basées sur un panier énergétique moyen.

3- Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie (INT+BIO)

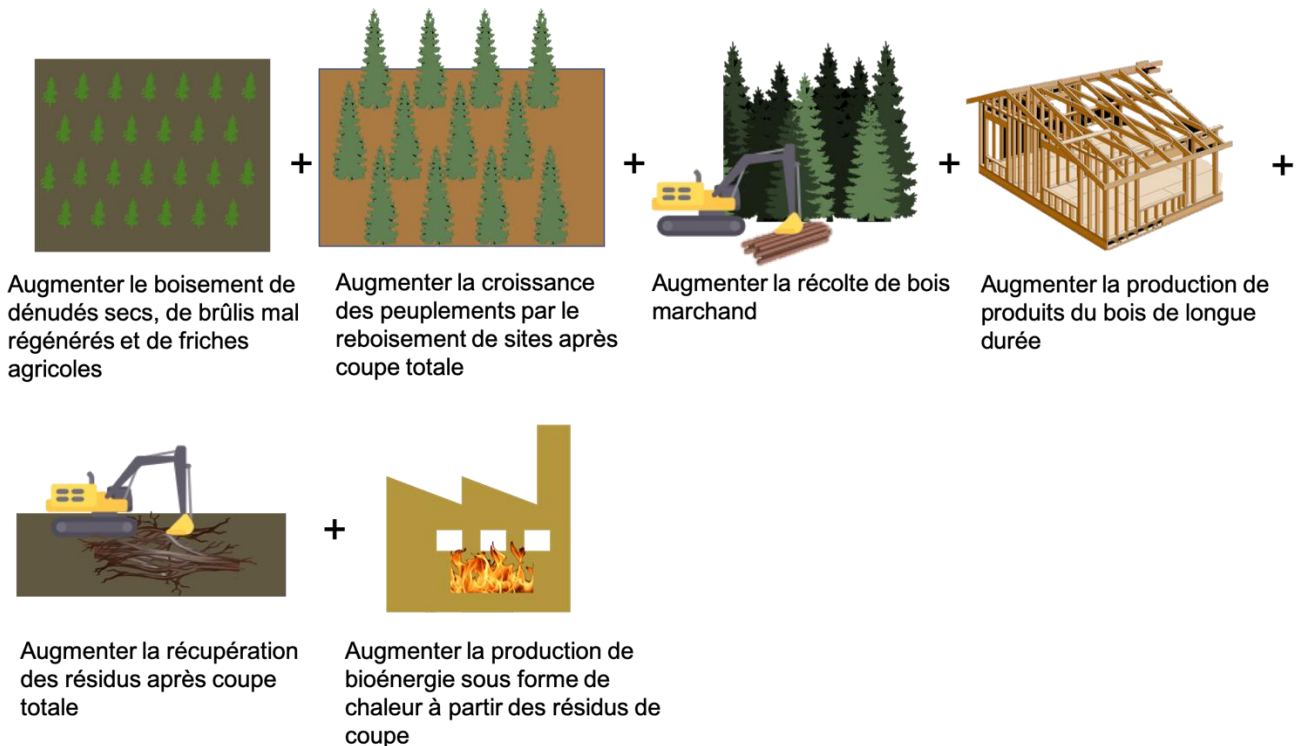


Figure 5. Scénario Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie (INT+BIO)

Ce scénario, qui est la simple addition des actions des deux scénarios précédents (INT et BIO), vise :

- une augmentation de la superficie de forêts sous aménagement, de la productivité forestière et de la production de bois marchand en respect des limites de la possibilité forestière annuelle de coupe et des objectifs d'aménagement écosystémique;
- une augmentation de la proportion de produits de longue durée issus du bois marchand récolté;
- une augmentation de la récolte de biomasse forestière pour la production de bioénergie, provenant de la récupération des résidus de coupe totale, en respect de la productivité des sols et de la biodiversité;
- une augmentation de l'utilisation de biomasse pour la production de chaleur considérant des actions non-ciblées basées sur un panier énergétique moyen.

4- Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie incluant la Récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP)

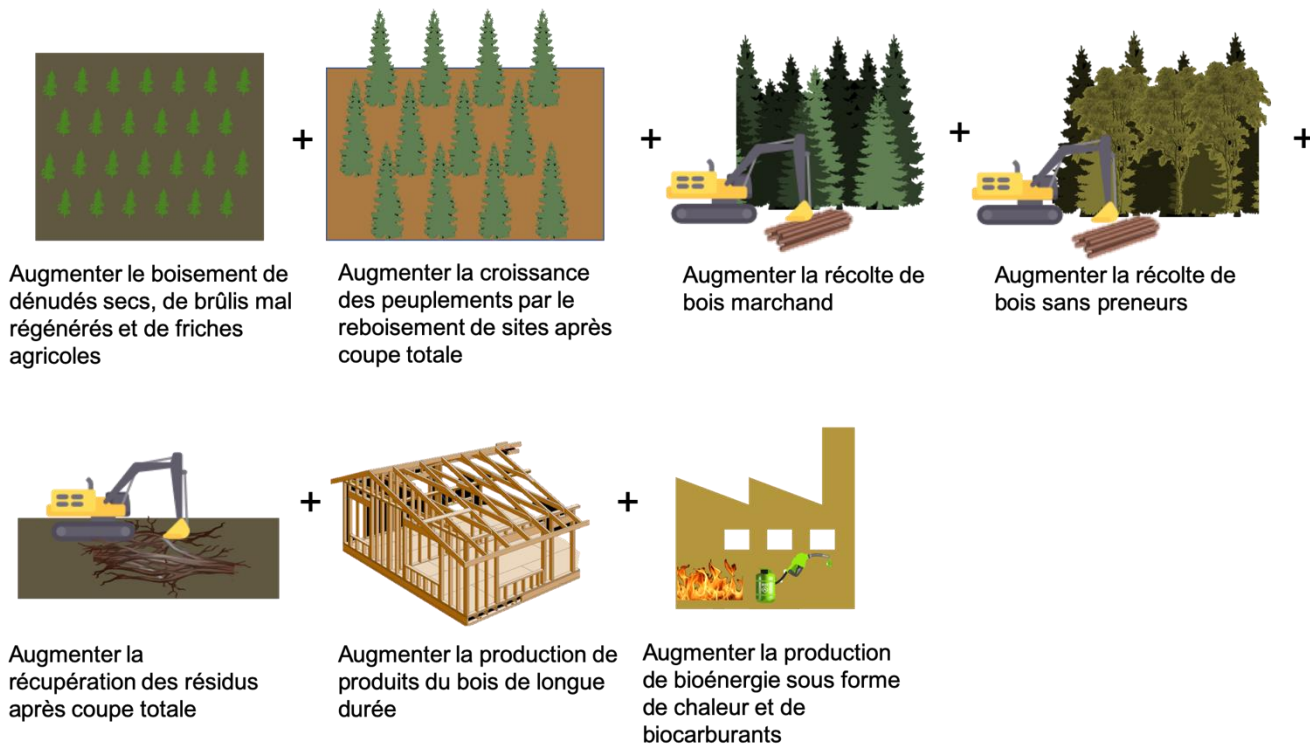


Figure 6. Scénario Intensification de l'aménagement et Développement de la bioénergie incluant la Récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP)

Ce scénario vise :

- une augmentation de la superficie de forêts sous aménagement, de la productivité forestière et de la production de bois marchand en respect des limites de la possibilité forestière annuelle de coupe et des objectifs d'aménagement écosystémique;
- une augmentation de la proportion de produits de longue durée issus du bois marchand récolté;
- une augmentation de la récolte de biomasse forestière pour la production de bioénergie, provenant de la récupération des résidus de coupe totale, en respect de la productivité des sols et de la biodiversité;
- une augmentation de la récolte des bois sans preneurs grâce au développement de la bioénergie, en respect des limites de la possibilité forestière annuelle de coupe et des objectifs d'aménagement écosystémique;
- une augmentation de l'utilisation de biomasse pour la production de chaleur considérant des actions non-ciblées basées sur un panier énergétique moyen.

Ce scénario implique un effet synergétique (et non simplement additif) entre différentes actions: on y simule le développement de marchés de la bioénergie (sous forme de chaleur et de biocarburants) créant une demande de matière première. Cette demande permet la récolte de bois faisant partie de la possibilité annuelle de coupe et dont la récolte s'harmonise aux objectifs de l'aménagement écosystémique, mais qui ne trouvent pas preneurs dans le cours normal des affaires, soit la situation actuelle de l'industrie et des marchés. Ces bois sans preneurs sont des tiges ou sections de tige de faible qualité ou d'essences non désirées [4]. On parle ici notamment des feuillus de trituration et des résineux de faible dimension ou de faible qualité, qui sont le plus souvent laissés sur

le site. Ces bois vont servir à la production de bioénergie. En plus d'une augmentation de la production de bioénergie, la récolte des bois sans preneurs pour la bioénergie permet :

- de désenclaver des volumes de bois marchand de qualité sciage, présents dans des tiges et peuplements dominés par des bois sans preneurs, et qui n'auraient autrement pas été récoltés, augmentant ainsi la récolte de bois destiné à la production de produits du bois de longue durée [5];
- d'augmenter la quantité de superficies d'éclaircie commerciale en raison de la présence d'un marché pour les bois issus des éclaircies; cela a pour effet de contribuer aux efforts d'éducation de peuplement et à la qualité future des bois sur pied.

Le Tableau 2 résume les différentes actions associées à chaque scénario.

Il est à noter que tous les scénarios (le cours normal des affaires et les quatre scénarios d'atténuation) n'incluent que les perturbations anthropiques en forêt (activités de récolte et d'aménagement), et excluent toute perturbation naturelle (feux, épidémies d'insectes, chablis, etc.). Ce point est discuté plus en détail dans la section Limites et autres considérations.

Tableau 2. Description des scénarios d'atténuation

Scénarios → ↓ Éléments de scénario	Description des éléments de scénario	INT Intensification de l'aménagement	BIO Développement de la bioénergie	INT+BIO Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie	INT+BIO+RBSP Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte de bois sans preneurs
Augmentation du boisement /reboisement de sites improductifs/non- forestiers	Augmentation des superficies forestières productives sous aménagement par la plantation de semis sur des dénuvés secs, des brûlis mal régénérés et des friches agricoles. Afin d'atteindre les rendements de plantation escomptés, des traitements sylvicoles de scarifiage, de dégagement et de nettoyage peuvent être réalisés.	Programme de boisement/reboisement de 50 000 ha/an de 2021 et 2030, dont : 30 000 ha/an de dénuvés secs, 10 000 ha/an de brûlis mal régénérés et 10 000 ha/an de friches agricoles.	Statu quo	Programme de boisement/reboisement de 50 000 ha/année de 2021 et 2030, dont : 30 000 ha/an de dénuvés secs, 10 000 ha/an de brûlis mal régénérés et 10 000 ha/an de friches agricoles.	Programme de boisement/reboisement de 50 000 ha/an de 2021 et 2030, dont : 30 000 ha/an de dénuvés secs, 10 000 ha/an de brûlis mal régénérés et 10 000 ha/an de friches agricoles.
Augmentation de la croissance des peuplements par le reboisement	Régénération de superficies récoltées par coupe totale par la plantation de semis. Afin d'atteindre les rendements de plantation escomptés, des traitements sylvicoles de scarifiage, de dégagement et de nettoyage peuvent être réalisés.	Augmentation des activités de reboisement de 17 000 ha/an à partir de 2020 par rapport au cours normal des affaires.	Statu quo	Augmentation des activités de reboisement de 17 000 ha/an à partir de 2020 par rapport au cours normal des affaires.	Augmentation des activités de reboisement de 17 000 ha/an à partir de 2020 par rapport au cours normal des affaires.
Augmentation de la récolte de bois marchand	Hausse des niveaux de récolte de bois marchands destinés à la transformation industrielle, en respectant la possibilité forestière annuelle de coupe.	Augmentation progressive de la récolte par rapport au cours normal des affaires : de 2020 à 2030 : +1,6 Mm³/an de 2031 à 2050 : +4,4 Mm³/an de 2051 à 2089 : +4,5 Mm³/an	Statu quo	Augmentation progressive de la récolte par rapport au cours normal des affaires : de 2021 à 2030 : +1,6 Mm³/an de 2031 à 2050 : +4,4 Mm³/an de 2051 à 2089 : +4,5 Mm³/an	Augmentation progressive de la récolte par rapport au cours normal des affaires : de 2020 à 2030 : +1,8 Mm³/an de 2031 à 2050 : +4,6 Mm³/an de 2051 à 2089 : +6,8 Mm³/an
Augmentation de la récupération des résidus de coupe totale	Hausse de la quantité de résidus, principalement sous forme de branches et de houppiers, récupérés sur des superficies de coupe totale. Cette hausse se fait par l'augmentation des superficies de coupe totale sur lesquelles les résidus sont récupérés, et par l'augmentation de la proportion des résidus de coupe totale produits qui sont techniquement récupérés sur les superficies où la récupération a lieu.	Statu quo	Augmentation de la récolte de résidus par rapport au cours normal des affaires : à partir de 2020 jusqu'en 2050 : +0,8 Mtma/an à partir de 2051 jusqu'en 2089 : +2 Mtma/an La biomasse ainsi récoltée est utilisée pour la production de chaleur en remplacement du panier d'énergie moyen consommé au Québec.	Augmentation de la récolte de résidus par rapport au cours normal des affaires : à partir de 2020 jusqu'en 2050 : +0,8 Mtma/an à partir de 2051 jusqu'en 2089 : +2 Mtma/an La biomasse ainsi récoltée est utilisée pour la production de chaleur en remplacement de l'énergie moyenne consommée au Québec.	Augmentation de la récolte de résidus par rapport au cours normal des affaires : à partir de 2020 jusqu'en 2050 : +0,8 Mtma/an à partir de 2051 jusqu'en 2089 : +2 Mtma/an La biomasse ainsi récoltée est utilisée pour la production de chaleur et les biocarburants en remplacement du panier d'énergie moyen consommé au Québec.
Augmentation de la croissance et de la qualité des arbres par l'éducation de peuplement	Augmentation des superficies traitées par éclaircie commerciale, qui consiste à récolter une partie des arbres marchands d'un peuplement afin d'en répartir le potentiel de production sur un nombre limité d'arbres bien distribués. La majorité des superficies traitées par éclaircie commerciales sont celles qui ont été soumises au	Statu quo	Statu quo	Statu quo	Augmentation progressive des superficies traitées par éclaircie commerciale par rapport au cours normal des affaires : de 2020 à 2030 : + 1 300 ha/an de 2031 à 2050 : + 1 700 ha/an de 2051 à 2089 : + 2 300 ha/an Les arbres ainsi récoltés sont utilisés pour le chauffage et les biocarburants.

Scénarios → ↓ Éléments de scénario	Description des éléments de scénario	INT Intensification de l'aménagement	BIO Développement de la bioénergie	INT+BIO Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie	INT+BIO+RBSP Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte de bois sans preneurs
	reboisement. Les arbres issus de ces éclaircies commerciales supplémentaires étant de faible qualité, ils sont utilisés pour la production de bioénergie.				
Récolte de bois sans preneurs	Récolte de bois faisant partie de la possibilité forestière annuelle de coupe, mais qui ne trouve pas preneur dans le réseau industriel actuel. Les volumes de bois d'essences feuillues issus de ces nouvelles coupes totales sont dirigés à 50 % vers la bioénergie et à 50 % vers le sciage. Les volumes de bois d'essences résineuses issus de ces nouvelles coupes totales sont dirigés vers le sciage.	Statu quo	Statu quo	Statu quo	Augmentation progressive supplémentaire de la récolte par rapport au cours normal des affaires : de 2020 à 2030 : 10 Mm³/an de 2031 à 2050 : 10 Mm³/an de 2051 à 2089 : 8 Mm³/an La portion de la récolte destinée à la bioénergie est utilisée pour le chauffage et les biocarburants.
Augmentation de la production et du rendement en produits de longue durée	Hausse de la proportion des bois marchands récoltés dirigés vers l'industrie du sciage et hausse de la proportion de produits de longue durée (sciages, panneaux) générée par les volumes de bois destinés au sciage.	Diminution progressive, entre 2020 et 2089, de 4 % des billes allant aux pâtes et papiers, compensée par une augmentation de l'allocation des volumes au sciage (+2 %) et aux panneaux (+2 %). Augmentation progressive, entre 2020 et 2061, du rendement en produits de longue durée (+4 %) et diminution équivalente (-4 %) de la production de copeaux et sciures.	Statu quo	Diminution progressive, entre 2020 et 2089, de 4 % des billes allant aux pâtes et papiers, compensée par une augmentation de l'allocation des volumes au sciage (+2 %) et aux panneaux (+2 %). Augmentation progressive, entre 2020 et 2061, du rendement en produits de longue durée (+4 %) et diminution équivalente (-4 %) de la production de copeaux et sciures.	Diminution progressive, entre 2020 et 2089, de 4 % des billes allant aux pâtes et papiers, compensée par une augmentation de l'allocation des volumes au sciage (+2 %) et aux panneaux (+2 %). Augmentation progressive, entre 2020 et 2061, du rendement en produits de longue durée (+4 %) et diminution équivalente (-4 %) de la production de copeaux et sciures.
Substitution	Émissions d'autres secteurs industriels tels que cimenteries, aciéries, produits de consommation et énergie évitées par l'entremise de l'utilisation de produits du bois et de bioénergie au-delà du cours normal des affaires. La bioénergie n'inclut que la biomasse utilisée en dehors du secteur forestier (p. ex. bâtiments, industrie non-forestière et transport si applicable).	Sciage : 0,91 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée Panneaux : 0,77 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée	Bioénergie : 0,43 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée	Sciage : 0,91 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée Panneaux : 0,77 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée Bioénergie : 0,43 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée	Sciage : 0,91 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée Panneaux : 0,77 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée Bioénergie : 0,43 tonne éq. CO ₂ évitée/tonne éq. CO ₂ utilisée

MÉTHODOLOGIE POUR LA MODÉLISATION DU POTENTIEL D'ATTÉNUATION ET DES IMPACTS FINANCIERS ET ÉCONOMIQUES

Potentiel d'atténuation

Le potentiel d'atténuation des changements climatiques des différents scénarios est estimé à partir du potentiel d'atténuation des émissions de GES vers l'atmosphère de ces scénarios en comparaison avec le cours normal des affaires.

Le potentiel d'atténuation des émissions de GES vers l'atmosphère comprend la somme des effets d'absorption de GES (séquestration du carbone) et de réduction des émissions de GES (substitution).

Les émissions de GES à l'atmosphère sont calculées en faisant la somme des émissions provenant des **forêts**, des **produits du bois** ainsi que de l'effet de **substitution** sur les marchés occasionné par les produits du bois.

L'atténuation potentielle d'un scénario donné est calculée en faisant la différence de flux entre ce scénario et le cours normal des affaires. Un flux positif représente une augmentation nette des émissions des GES vers l'atmosphère; un flux négatif indique un effet net de puits (séquestration), ou une réduction des émissions lorsque des produits du bois évitent des émissions liées à la production et à l'utilisation d'autres produits à forte intensité de GES (substitution).

Il est ainsi possible de calculer l'**atténuation annuelle**, soit la différence de flux entre un scénario et le cours normal des affaires pour une année donnée. Il est aussi possible de calculer l'**atténuation cumulative**, soit la différence entre la somme des flux annuels d'un scénario et la somme des flux annuels du cours normal des affaires, pour une période de temps donnée.

Toutes les valeurs de flux et d'atténuation sont calculées en mégatonnes d'équivalent CO₂ (Mt éq. CO₂). L'équivalent CO₂ est une unité utilisée pour compiler les émissions de différents GES : l'émission en équivalent CO₂ est la quantité émise de CO₂ qui provoquerait le même forçage radiatif (c'est-à-dire un effet réchauffant sur le climat), pour un horizon de 100 ans, qu'une quantité émise d'un ou de plusieurs GES.

On obtient ainsi, pour chaque scénario :

- une **atténuation annuelle** (effet net sur le flux annuel par rapport au cours normal des affaires) pour les années 2030, 2050 et 2089;
- une **atténuation cumulative** (c'est-à-dire la somme des atténuations annuelles; effet net sur la somme des flux annuels par rapport au cours normal des affaires) pour les périodes 2020-2030, 2020-2050 et 2020-2089.

Les méthodes de comptabilisation des flux de GES servant au calcul du potentiel d'atténuation pour les forêts, les produits du bois et la substitution sont décrites aux sections suivantes.

Forêts

L'aire d'étude considérée englobe la totalité des superficies forestières de la forêt commerciale du Québec, incluant les forêts publiques et les forêts privées.

Les flux de GES provenant des forêts de l'aire d'étude sont simulés à partir du *Système national de surveillance, de comptabilisation et de production de rapports concernant le carbone des forêts* [6]. Le point central de ce système est le *Modèle du bilan de carbone du secteur forestier canadien*, mieux connu sous son acronyme anglais CBM-CFS3.

CBM-CFS3 est un outil de comptabilisation des stocks et des flux de carbone dans les écosystèmes forestiers; il peut être utilisé à des échelles aussi différentes que celles d'un peuplement, d'une région ou d'un pays. Dans CBM-CFS3, l'écosystème forestier est divisé en réservoirs de masse vivante (tiges marchandes d'espèces résineuses et feuillues, feuillage, racines grossières, racines fines, branches, arbres non marchands, etc.) et de matière organique morte (litière, débris ligneux, horizons organiques et minéraux du sol). Les stocks de carbone des réservoirs, ainsi que les flux entre les réservoirs et avec l'atmosphère, sont simulés par CBM-CFS3 [7]. Les résultats générés par ce modèle répondent aux exigences internationales du Rapport d'inventaire national pour les écosystèmes forestiers, tel que défini par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du Protocole de Kyoto [8].

Dans le cadre du mandat, les données d'inventaire forestier et de courbes de rendement utilisées dans la modélisation des forêts proviennent de la base de données du Rapport d'inventaire national 2018 du Canada [9]. Certains ajustements ont été effectués à ces données afin de correspondre au mieux à la réalité actuelle du Québec.

Produits du bois

Le modèle CBM-CFS3 permet de compiler les transferts de carbone sous forme de bois ou de biomasse récoltés vers les usines de transformation du bois. Le carbone stocké dans les produits du bois issus de ces transferts, ainsi que les émissions de GES liées à la dégradation ou à la combustion de ces produits au cours de leur vie, sont comptabilisés grâce à un chiffrier inspiré de l'outil du Service canadien des forêts appelé *Carbon Budget Model Framework for Harvested Wood Products* (CBM-FHWP). Le chiffrier permet de simuler l'évolution du carbone stocké dans les produits du bois et des émissions qui sont associées à l'utilisation de ces produits, grâce à des hypothèses sur la demi-vie de ces produits (la demi-vie étant le temps mis à la moitié du stock d'un produit donné pour atteindre sa fin de vie). Les valeurs de demi-vie utilisées dans le cadre du présent mandat sont issues des travaux du GIEC [10] :

- Sciages : demi-vie de 35 ans;
- Panneaux : demi-vie de 25 ans;
- Pâtes et papiers : demi-vie de 2 ans.

La bioénergie (incluant la biomasse pour le chauffage et les biocarburants) n'a quant à elle pas de valeur de demi-vie : tout le carbone contenu dans la bioénergie produite à partir de bois récolté est émis la même année que la récolte.

En accord avec les règles internationales de comptabilisation du carbone forestier [11] (y compris celles utilisées par le Canada), la totalité du carbone des produits issus de la transformation du bois récolté par le secteur forestier québécois (tel qu'estimé par CBM-CFS3) et des émissions qui leur sont associées (dégradation et combustion) sont comptabilisés; cela comprend les produits qui sont exportés hors des frontières du Québec.

L'évolution du carbone des produits du bois et de leurs émissions repose sur des hypothèses d'allocation du bois entre les différentes industries et du mouvement des coproduits qu'elles génèrent : c'est ce qu'on appelle le panier de produits du bois. Dans le cadre du mandat, l'évolution du panier de produits au cours de la période de simulation (2020 à 2089) varie entre le cours normal des affaires et les différents scénarios d'atténuation; cela permet notamment d'évaluer l'effet d'une augmentation du rendement du réseau industriel forestier en produits du bois de longue durée et en bioénergie. Les détails de l'évolution du panier de produits pour l'analyse de base des scénarios sont inclus dans les Tableau 1 et Tableau 2. Une analyse de sensibilité des mêmes scénarios, mais avec une augmentation du rendement matière anticipée, a aussi été évaluée (voir ce qui suit).

Analyse de sensibilité : transition industrielle accélérée

Afin d'évaluer plus finement l'impact d'une transition industrielle accélérée générant une proportion encore plus élevée de produits de longue durée, une analyse de sensibilité a été effectuée pour tester l'effet d'un panier de produits amélioré, par rapport au cours normal des affaires (Tableau 1) et aux scénarios d'atténuation de base (Tableau 2). Ainsi, ce panier amélioré prévoit :

- une allocation des billes allant au sciage passant de 84 % à 90 % entre 2020 et 2051, et
- un rendement en produits de longue durée passant de 48 % à 56 % entre 2020 et 2041.

Substitution sur les marchés

L'effet de substitution des matériaux et de l'énergie (acier, béton, diesel, mazout, etc.) par des produits du bois est estimé à partir de facteurs de déplacement. Le facteur de déplacement quantifie les émissions de GES qui sont évitées lorsque le bois est utilisé en remplacement d'un autre matériau. Les facteurs de déplacement sont calculés comme étant la différence entre les émissions de GES associées à la production et à l'utilisation du matériau substitué pour une application spécifique, d'une part, et les émissions associées à la production et à l'utilisation du bois remplissant la même fonction [12]. Le facteur de déplacement intègre ainsi une comparaison des émissions associées au cycle de vie des produits du bois (opérations de récolte et de transformation, etc.), par rapport au cycle de vie des matériaux et sources d'énergie que le bois peut substituer.

Les facteurs de déplacement sont exprimés en tonnes d'émissions de carbone évitées par tonne de carbone contenue dans le produit du bois. Plus la valeur du facteur est élevée, plus la réduction des émissions liée à l'utilisation du bois sera importante.

Il existe dans la littérature une variation significative des facteurs de déplacement. Les variations sont causées par le fait que les facteurs sont calculés pour un produit (ou un panier de produits) avec une fonction spécifique, qui peuvent varier d'une étude à l'autre (p. ex. : construction résidentielle unifamiliale vs immeuble à logement). De plus, le périmètre comptable servant à compiler les émissions liées à la production et l'utilisation des divers produits varie entre les études, certaines d'entre elles considérant de manière plus ou moins complète le cycle de vie du produit (par exemple en incluant les émissions liées à la fin de vie du produit).

Par défaut, les facteurs de déplacement utilisés dans le cadre de ce mandat sont de :

- 0,91 tonne éq. CO₂ évitée / tonne éq. CO₂ pour les produits du sciage;
- 0,77 tonne éq. CO₂ évitée / tonne éq. CO₂ pour les panneaux et produits dérivés;
- 0,43 tonne éq. CO₂ évitée / tonne éq. CO₂ pour la bioénergie (chaleur et biocarburants utilisés en dehors du secteur forestier).

Ces valeurs ont été respectivement estimées à partir de données de l'outil Gestimat de Cecobois (sciage), tirées des travaux de Smyth, *et al.* [13] pour le Canada (panneaux et produits dérivés), et calculées à partir de données internes à FPInnovations (bioénergie).

Il est important de noter que l'effet de substitution ainsi caractérisé par les facteurs de déplacement survient à l'échelle mondiale et non pas seulement au Québec. L'atténuation comptabilise ainsi des effets de substitution qui se produisent à l'extérieur des frontières du Québec suite à l'utilisation des produits manufacturés avec le bois récolté au Québec, puis exportés. Or, la substitution se produisant à l'extérieur des frontières ne fait pas partie du périmètre comptable de l'inventaire national de GES du Canada, ni de l'inventaire de GES du Québec. Cette question est traitée plus en profondeur dans la section Limites et autres considérations. Une analyse de sensibilité des mêmes scénarios, mais avec une réduction des émissions plus élevée que dans l'analyse de base a été étudiée (voir ici-bas).

Analyse de sensibilité : substitution ciblée sur les marchés

Afin d'évaluer l'effet d'une substitution plus ciblée (et donc plus efficace) par les produits du bois sur les marchés, un facteur de déplacement moyen de 1,2 pour l'ensemble des produits (sciage, panneaux et produits dérivés, bioénergie) est aussi testé. Cette valeur de 1,2 représente la moyenne pour l'ensemble des produits du bois (matériaux et bioénergie) calculée dans une récente méta-analyse de la littérature [14]. Cette réduction plus élevée pourrait être le résultat de politiques qui orientent les substitutions de sorte à maximiser l'impact en GES des remplacements survenant sur les marchés.

Il est pertinent de noter que des facteurs de déplacement entre 1,6 et 2,0 seraient envisageables dans le remplacement de contenants en polyéthylène par du carton; le remplacement de polypropylène par un biocomposite permettrait d'atteindre une valeur supérieure à 3,0. Le calcul de facteurs de déplacement spécifiques au Québec et aux produits de nouvelle génération montre que l'utilisation d'un facteur de déplacement de 1,2 n'est pas exagérée.

Impacts financiers et économiques

Dans le cadre du mandat, deux approches sont utilisées pour évaluer les coûts et les revenus des scénarios d'atténuation des changements climatiques, l'une financière, l'autre économique.

Approche financière

L'approche financière est empruntée au modèle d'analyse économique développé par le Service canadien des forêts, connu sous son acronyme anglais CBM-MEA [15] et qui utilise les extrants du modèle CBM-CFS3. Suivant l'approche financière, les flux financiers (revenus et coûts) de chaque scénario sont de deux types : des flux forestiers et des flux attribuables aux produits.

En forêt, les revenus proviennent de la vente de bois et de biomasse aux usines de transformation. Les coûts comprennent les activités d'aménagement forestier, d'opérations forestières, de protection des forêts contre les insectes et les feux, de voirie et transport (p. ex. construction de chemins) ainsi que d'autres frais tels que des frais d'hébergement des travailleurs sylvicoles. Le modèle financier utilise les prix des bois et de la biomasse livrée aux usines, de même que les coûts d'aménagement et d'opérations. La collecte de données a été réalisée pour le contexte québécois pour chaque activité d'aménagement des scénarios à partir des données du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et du Bureau de mise en marché des bois (BMMB) ainsi que de l'outil FPIInterface développé par FPIInnovations.

Le second flux du modèle financier est attribuable aux produits forestiers. Il représente les revenus des usines issus de la mise en marché de produits forestiers, incluant les sciages, les panneaux, les pâtes et papiers et la bioénergie. Les coûts de production sont soustraits des revenus. Les intrants de modélisation relatifs aux produits proviennent de données de FEA, FisherSolve et d'autres fournisseurs privés.

Le revenu net (RN) de chaque scénario est la somme de deux différences (Équation 1). D'une part, il comprend la différence entre les revenus et les coûts forestiers; d'autre part, il comprend la différence entre les revenus et les coûts attribuables aux produits. Le revenu net de chaque scénario, qui peut être positif ou négatif, est comparé au revenu net du cours normal des affaires (CNA) afin de déterminer un revenu net marginal (Équation 2).

Équation 1 $RN = (R_{AF} - C_{AF}) + (R_p - C_p)$
Équation du revenu net utilisé dans CBM-MEA

Équation 2 $RN \text{ marginal} = RN \text{ scénario atténuation} - RN \text{ CNA}$
Équation du revenu net marginal

RN : Revenu net

RAF/CAF : Revenu / coût d'aménagement forestier

RP/CP : Revenu / coût provenant des produits

Notons que, pour un scénario donné, le revenu net marginal est le même pour l'analyse de base et pour l'analyse de sensibilité.

Le revenu net du cours normal des affaires servant à évaluer les revenus nets marginaux des scénarios d'atténuation est de -4,7 G\$ sur la période 2020-2089.

Le revenu net marginal des scénarios sert au calcul des coûts d'atténuation exprimés en \$/t éq. CO₂. Le coût d'atténuation d'un scénario donné est évalué en divisant le revenu net marginal de ce scénario par les potentiels d'atténuation obtenus pour l'analyse de base et pour l'analyse de sensibilité. Le coût d'atténuation rapporté pour un scénario donné est le point moyen entre le coût d'atténuation obtenu pour l'analyse de base et pour l'analyse de sensibilité. Il est à noter que, suivant la méthode employée dans le MEA, les flux financiers de chaque année sont actualisés à un taux constant de 3 %; de la même manière, les atténuations de chaque scénario sont actualisées à un taux constant de 1 %.

Approche économique

Pour sa part, l'analyse économique s'appuie sur le guide d'analyse économique appliquée aux investissements sylvicoles du Bureau de mise en marché des bois (BMMB) du MFFP. En comparaison avec l'analyse financière, qui tient uniquement compte des coûts engendrés et des revenus des opérations d'un système ou d'une entreprise, la rentabilité économique inclut aussi les revenus au gouvernement ainsi que la valeur ajoutée créée par le biais des emplois générés dans le secteur forestier. L'analyse tient aussi compte du coût d'opportunité du capital et de la main-d'œuvre. L'analyse exclut les revenus qui pourraient être générés en lien avec la valeur du carbone (crédits carbone, crédits compensatoires et/ou droits d'émissions).

Dans ce contexte, la valeur marchande des bois sur pied est un revenu auquel on adosse deux autres types de bénéfices permettant de refléter la valeur économique créée dans l'industrie et la valeur économique créée par l'emploi : ces revenus sont le bénéfice net avant impôt (aussi appelé rente financière) et la rente salariale. La rente salariale exprime l'écart de richesse pour un travailleur œuvrant dans les secteurs de la sylviculture, de la récolte et de la transformation du bois par rapport à un autre secteur d'activité économique. L'évaluation économique reconnaît aussi des bénéfices aux activités sylvicoles non-commerciales, c'est-à-dire ne générant pas de volumes de bois marchand, en considérant une rente salariale et un bénéfice des entreprises. Cette approche permet d'obtenir les coûts et revenus actualisés et la valeur actuelle nette (VAN) pour le cours normal des affaires et chacun des scénarios d'atténuation. La différence entre les résultats de chaque scénario et le cours normal des affaires permet d'estimer l'impact économique marginal des scénarios.

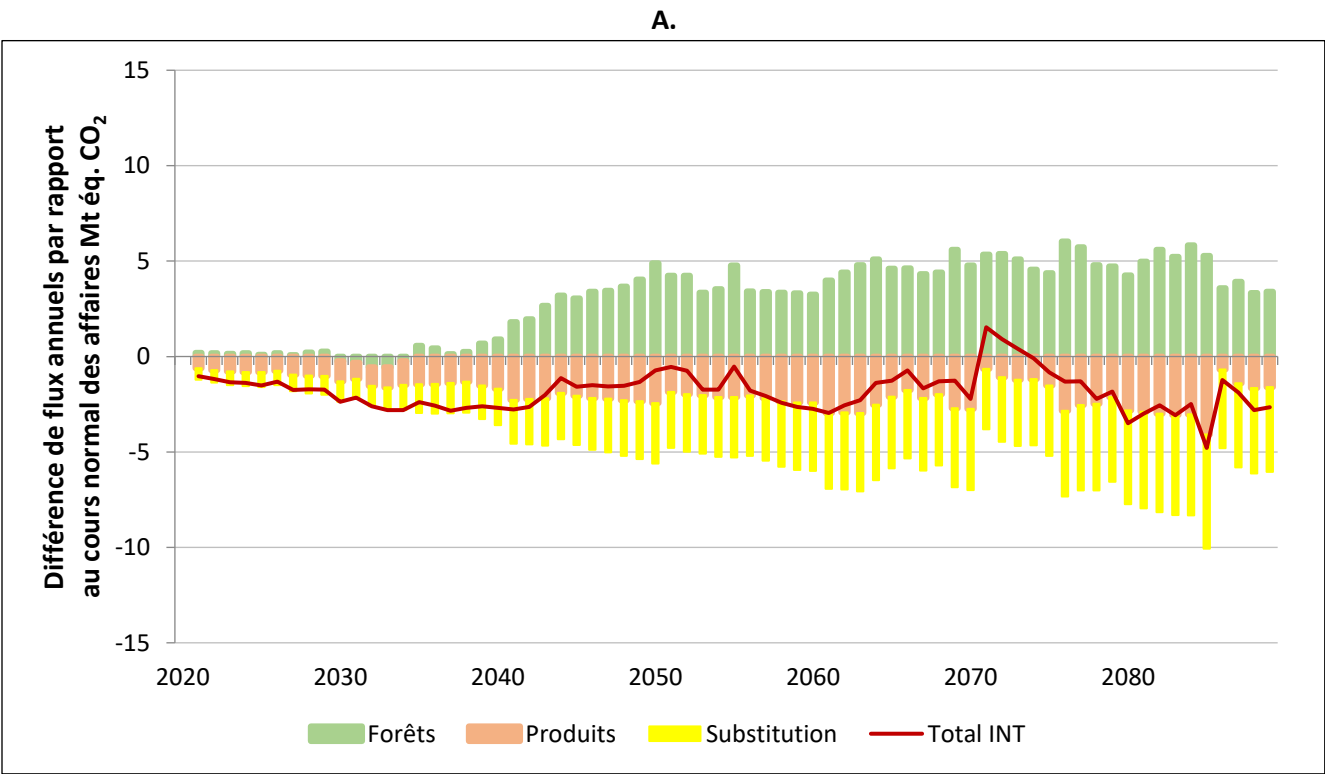
RÉSULTATS

Potentiel d'atténuation des flux de GES

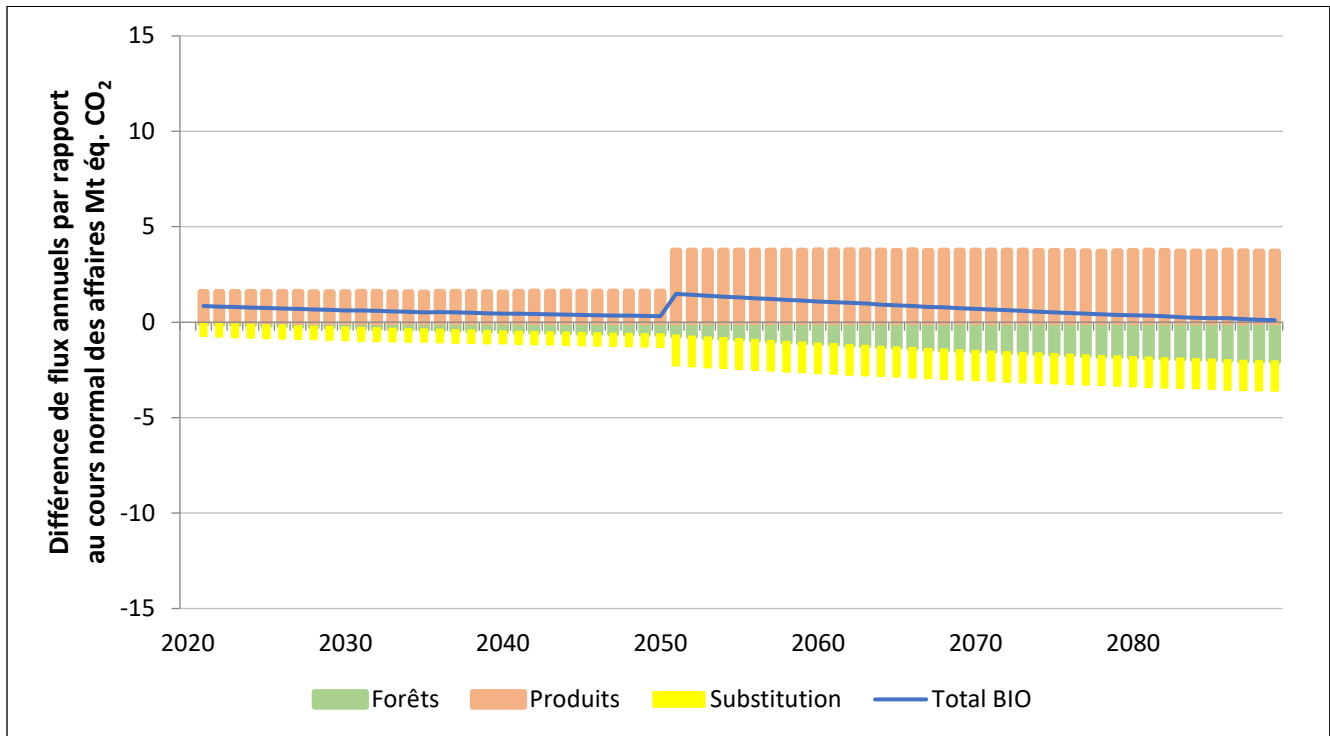
Le potentiel d'atténuation des émissions de GES vers l'atmosphère de chaque scénario a été évalué (analyse de base). Une analyse de sensibilité, visant à tester l'effet d'une transition industrielle accélérée dans le secteur forestier et d'une substitution ciblée des produits du bois sur les marchés, a aussi été réalisée (voir section Méthodologie pour la description des paramètres de l'analyse de base et de l'analyse de sensibilité).

Analyse de base

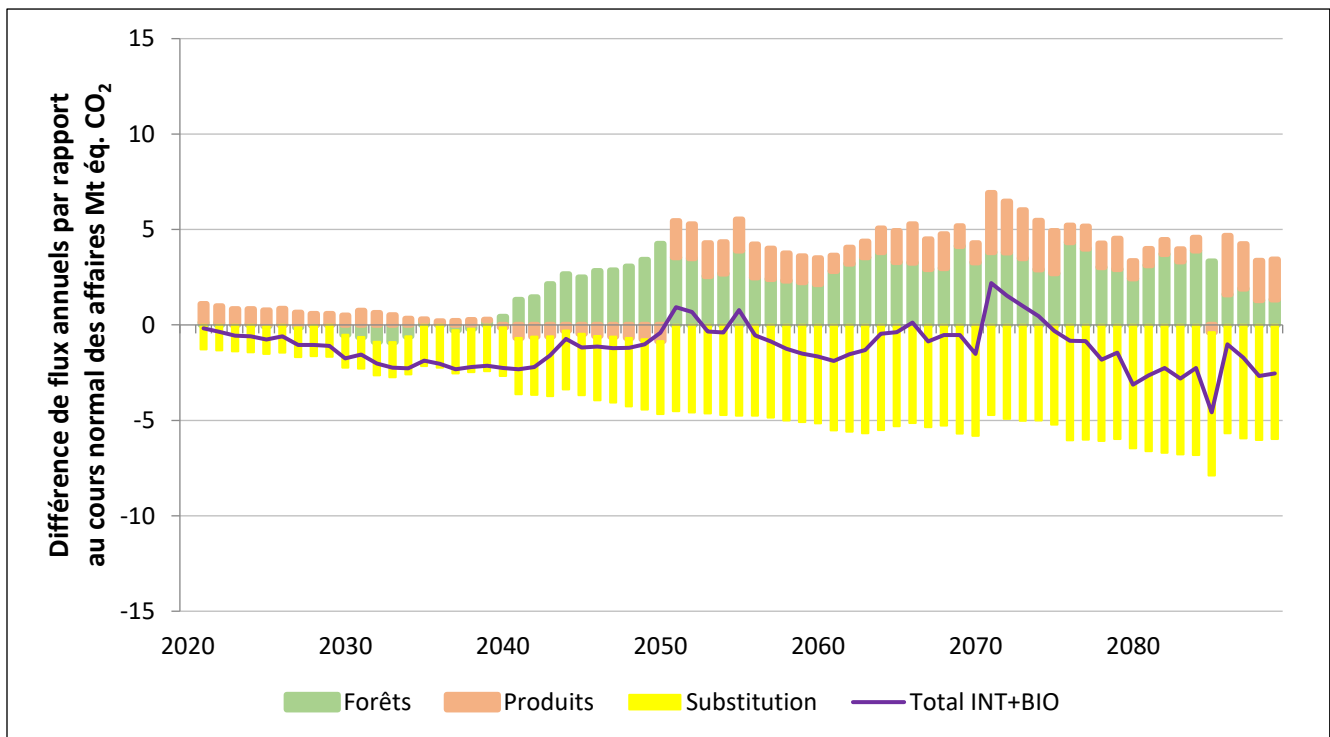
La Figure 7 montre l'effet net causé par chacun des scénarios sur les flux annuels provenant des forêts et des produits par rapport au cours normal des affaires, incluant l'effet de substitution des produits du bois supplémentaires mis sur les marchés par chacun des scénarios. Les variations des flux observées entre les années sont causées par le déploiement graduel des actions associées à chaque scénario et par l'effet de chacune des actions, tel que simulées par le modèle CBM-CFS3. De plus, en raison de la variabilité des conditions forestières, les actions de récolte et d'aménagement créent des effets variables d'année en année sur les flux en forêt et dans les produits du bois.



B.



C.



D.

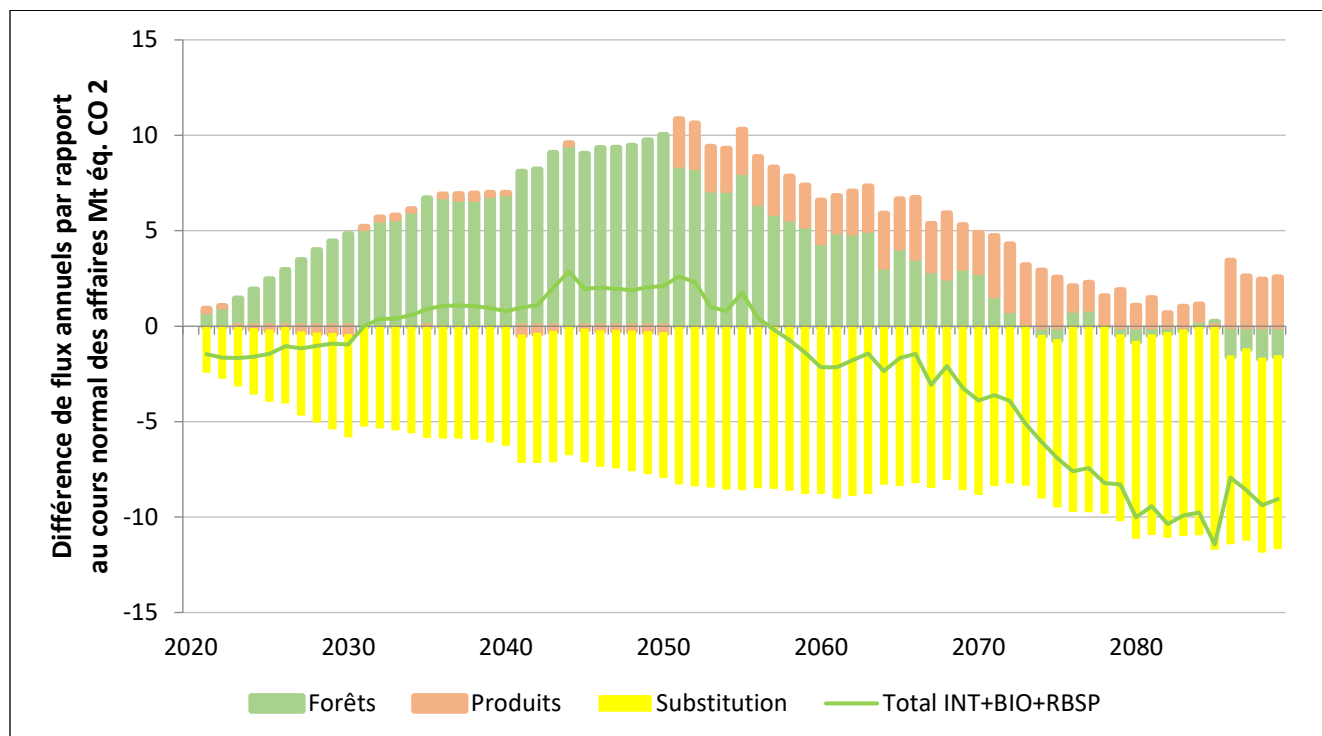


Figure 7. Différence de flux annuels de GES entre les quatre scénarios étudiés et le cours normal des affaires

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. A) Intensification de l'aménagement (INT), B) Développement de la bioénergie (BIO), C) Intensification de l'aménagement + développement de la bioénergie (INT+BIO) et D) Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte de bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP).

La Figure 8 résume le potentiel d'atténuation annuelle des flux de GES de chaque scénario pour les années 2030, 2050 et 2089.

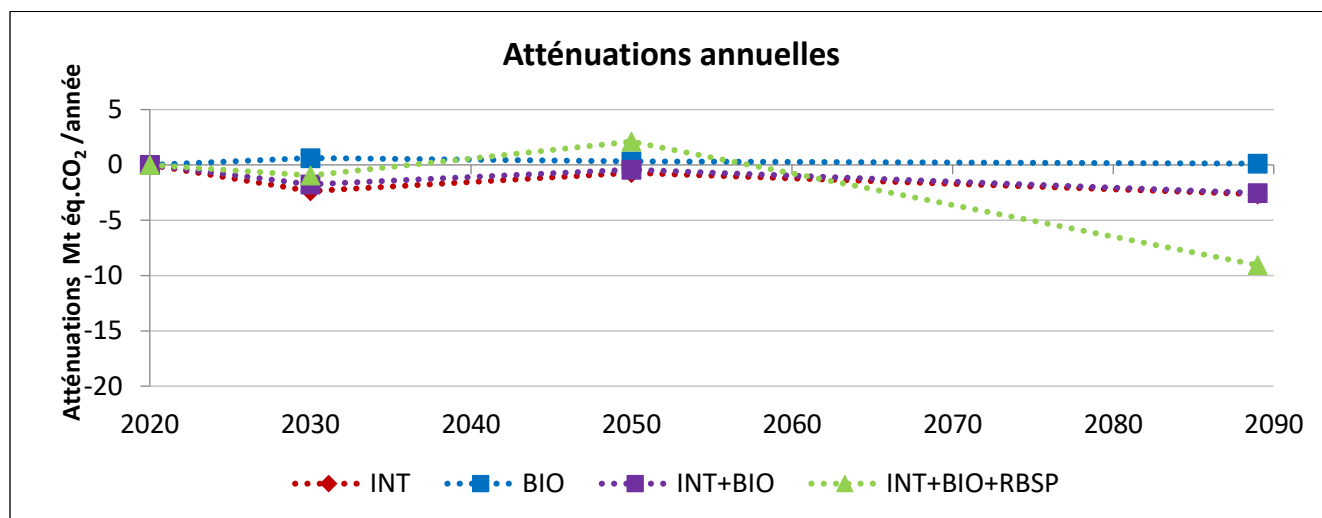


Figure 8. Flux annuels nets de GES des scénarios étudiés, par rapport au cours normal des affaires

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

La Figure 9 résume les atténuations cumulatives, i.e. le cumul des atténuations nettes annuelles, de 2020 jusqu'aux années 2030, 2050 et 2089, pour chacun des scénarios étudiés.

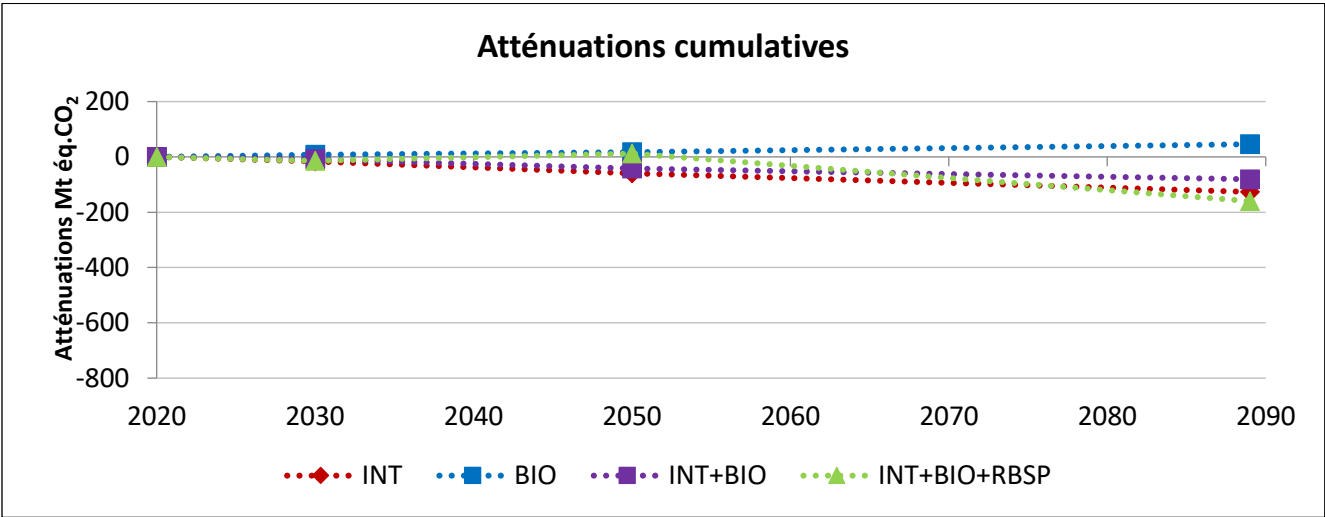


Figure 9. Flux cumulatifs nets de GES des scénarios étudiés, par rapport au cours normal des affaires

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

Les scénarios qui comprennent des activités d'intensification de l'aménagement et l'augmentation de la proportion de produits de longue durée (INT, INT+BIO, INT+BIO+RBSP) produisent des atténuations annuelles en 2030 de l'ordre de -1,0 à -2,4 Mt éq. CO₂/année; cet effet est notamment dû au pouvoir de substitution des produits de longue durée sur les marchés. Cela se traduit par des atténuations cumulatives pour 2030 de l'ordre de -8,2 à -16,4 Mt éq. CO₂.

La Figure 8 montre que le potentiel d'atténuation annuel de ces trois scénarios (INT, INT+BIO, INT+BIO+RBSP) est réduit au cours des deux décennies suivantes. Cet effet est dû à la hausse importante de la récolte de bois. Dans les premières années suivant une coupe totale, la forêt devient généralement une source nette d'émissions de GES à l'atmosphère en raison de la décomposition accrue de la matière organique générée sur les parterres de coupe; cela dure jusqu'à ce que la croissance de la régénération devienne suffisamment importante pour compenser ces émissions [16]. L'Encadré 1 permet d'expliquer plus en détail ces processus.

Les atténuations annuelles à l'année 2050 pour les scénarios INT+BIO et INT sont respectivement de -0,4 et -0,7 Mt éq. CO₂/année, ce qui correspond à des atténuations cumulatives de -42,1 à -59,4 Mt éq. CO₂. Les scénarios BIO et INT+BIO+RBSP n'offrent pas d'atténuation en 2050 dans l'analyse de base. Les émissions cumulatives de ces deux scénarios sur la période 2020-2050 sont respectivement de 17,3 et 11,8 Mt éq. CO₂.

À plus long terme (2089), la croissance des sites régénérés, le stockage dans les produits de longue durée issus de la coupe et leur effet de substitution sur les marchés génère des bénéfices annuels plus importants. Ces bénéfices varient de -2,5 à -9,1 Mt éq. CO₂/année en 2089 pour les scénarios INT, INT+BIO et INT+BIO+RBSP; les atténuations cumulatives atteignent alors de -80,9 (pour INT+BIO) à -159,8 Mt éq. CO₂ (pour INT+BIO+RBSP). Par exemple, le programme de boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers, réalisé entre les années 2021 à 2030, se fait sentir particulièrement à partir de 2050, avec des atténuations cumulatives atteignant alors -26,8 Mt éq. CO₂.

On constate que pour le scénario d'intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP), le potentiel d'atténuation croît de manière régulière à partir de 2050; les actions prises au cours des premières décennies procurent des bénéfices d'atténuation qui s'accroissent donc dans le temps. Cela est dû à la synergie créée dans ce scénario entre différentes actions. La récolte des bois sans preneurs pour la bioénergie permet :

- la mobilisation de produits du bois de longue durée, et
- la remise en production de peuplements de faible productivité/faible qualité, ainsi que leur remplacement par une régénération à la croissance vigoureuse, qui pourra procurer dans le futur du bois de qualité pour la production de produits de longue durée.

La contribution de la bioénergie à l'atténuation des flux de GES semble en soi faible, sinon négative, dans l'analyse de base. Ce résultat peut être expliqué par deux facteurs : la dynamique de la décomposition, telle que comptabilisée par le modèle CBM-CFS3, et la valeur du facteur de déplacement pour la bioénergie utilisé dans l'analyse de base (valeur de 0,43). L'Encadré 2 explique plus en détail ces facteurs.

Dans le cas des résidus de coupe, leur récupération cause, d'une part, une baisse des émissions dues à la décomposition évitée en forêt. Or, une étude récente suggère que le taux de décomposition des débris ligneux pour le Québec dans CBM-CFS3 est plus faible que celui observé sur le terrain [17] minimisant ainsi l'effet d'atténuation réel de la récupération des résidus pour la production de bioénergie. D'autre part, la combustion des résidus pour la production d'énergie cause l'émission à l'atmosphère de leur contenu en carbone, ainsi que l'évitement d'émissions due à la substitution de carburants fossiles : pour chaque tonne de éq. CO₂ émise par combustion de bioénergie, une émission de 0,43 t éq. CO₂ provenant d'énergies fossiles est évitée. Or, cette valeur de 0,43 est conservatrice par rapport à d'autres valeurs de la littérature : une étude canadienne suggère par exemple qu'une utilisation de la bioénergie visant prioritairement le remplacement des énergies fossiles dans les installations dont l'intensité de GES est la plus élevée (c'est-à-dire qui émettent la plus grande quantité de GES par unité d'énergie) permet de produire un facteur de déplacement de 0,89 [13], soit le double de celui utilisé ici. L'Encadré 2 présente les résultats du scénario de développement de la bioénergie (BIO) avec différents facteurs de déplacement.

Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité réalisées sur les scénarios permettent de souligner l'effet important de la production de bois de longue durée, et de l'utilisation judicieuse des produits du bois sur les marchés en remplacement de matériaux et d'énergies à fortes émissions de GES. Les Figure 10 et Figure 11 présentent les atténuations annuelles et cumulatives des scénarios lorsqu'on y ajoute l'effet combiné :

- d'une transition industrielle accélérée visant l'augmentation rapide de l'allocation des billes au sciage et une augmentation rapide du rendement en produits de longue durée dans les scieries, et
- d'une substitution ciblée des produits du bois sur les marchés, représentée par un facteur de déplacement plus élevé (voir le détail de ces paramètres d'analyse de sensibilité dans la section Méthodologie).

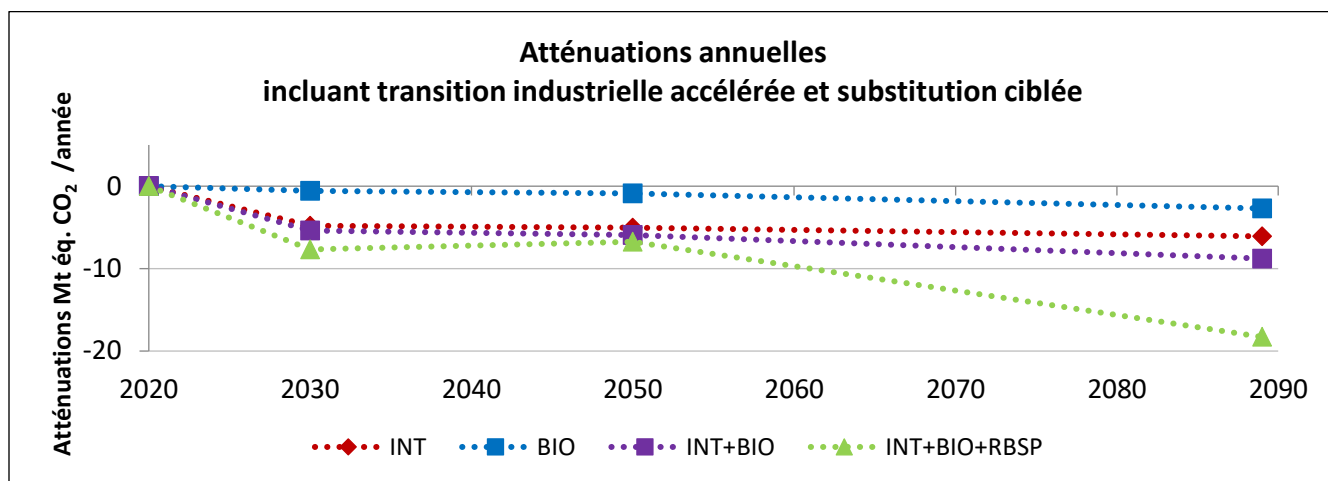


Figure 10. Flux annuels nets de GES des scénarios étudiés, incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée, par rapport au cours normal des affaires

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

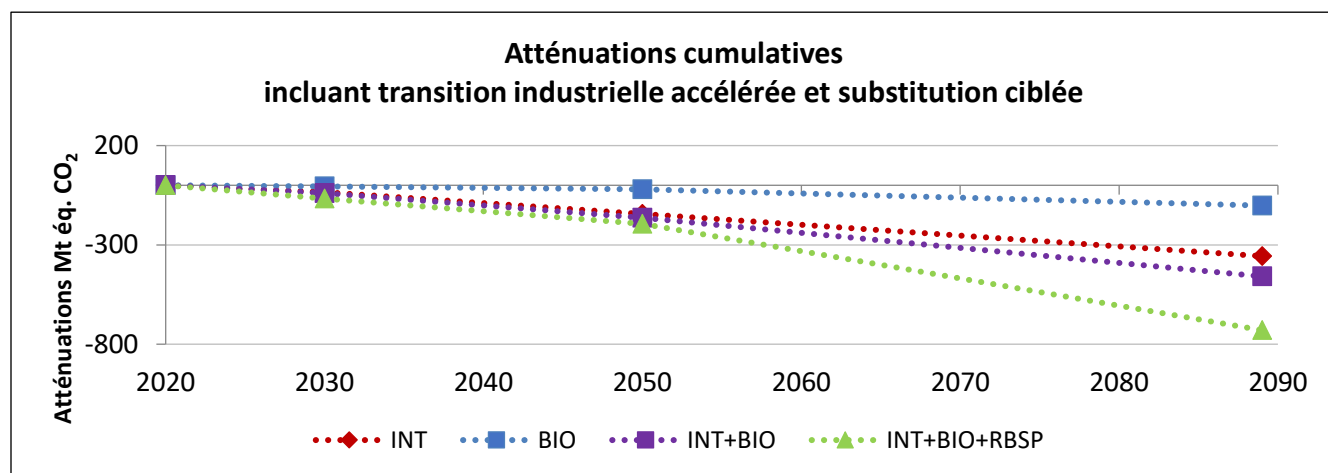


Figure 11. Flux cumulatifs nets de GES des scénarios étudiés, incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée, par rapport au Cours normal des affaires

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

L'analyse de sensibilité des mêmes scénarios étudiés dans l'analyse de base montre que les trois scénarios qui incluent de l'intensification de l'aménagement forestier procurent des atténuations annuelles qui varient de -4,8 à -7,7 Mt éq. CO₂/an en 2030 dans un contexte de transition industrielle accélérée et de substitution ciblée. Cela donne des atténuations cumulatives allant de -35 à -66 Mt éq. CO₂ de 2020 à 2030. À l'échéance 2050, les atténuations annuelles des scénarios d'intensification (INT, INT+BIO et INT+BIO+RBSP) oscillent entre -5,1 et -6,7 Mt éq. CO₂/an. Les sommes de ces atténuations annuelles équivalent à des atténuations cumulatives variant entre -144 et -195 Mt éq. CO₂ de 2020 à 2050. À long terme (2020-2089), les scénarios d'intensification permettent

des atténuations annuelles allant de -6,1 à -18,3 Mt éq. CO₂/an pour des atténuations totales variant de -357 à - 730 Mt éq. CO₂.

Le scénario BIO offre une atténuation annuelle passant de -0,6 Mt éq. CO₂/an en 2030 à -2,7 Mt éq. CO₂/an en 2089. Ces atténuations annuelles correspondent à des atténuations cumulatives passant de -5 Mt éq. CO₂ en 2030 à -102 Mt éq. CO₂ en 2089.

ENCADRÉ 1 : QUE SE PASSE-T-IL LORS DE LA RÉCOLTE?

La Figure 12 présente un exemple d'évolution des stocks de carbone forestier (le carbone stocké dans les différents compartiments de l'écosystème forestier) suite à la coupe totale d'un hectare supplémentaire de forêt, par rapport au cours normal des affaires. Cet exemple est basé sur un peuplement de sapin baumier et de bouleau blanc tel que retrouvé dans la réserve faunique des Laurentides, avec une révolution de coupe de 70 ans [18].

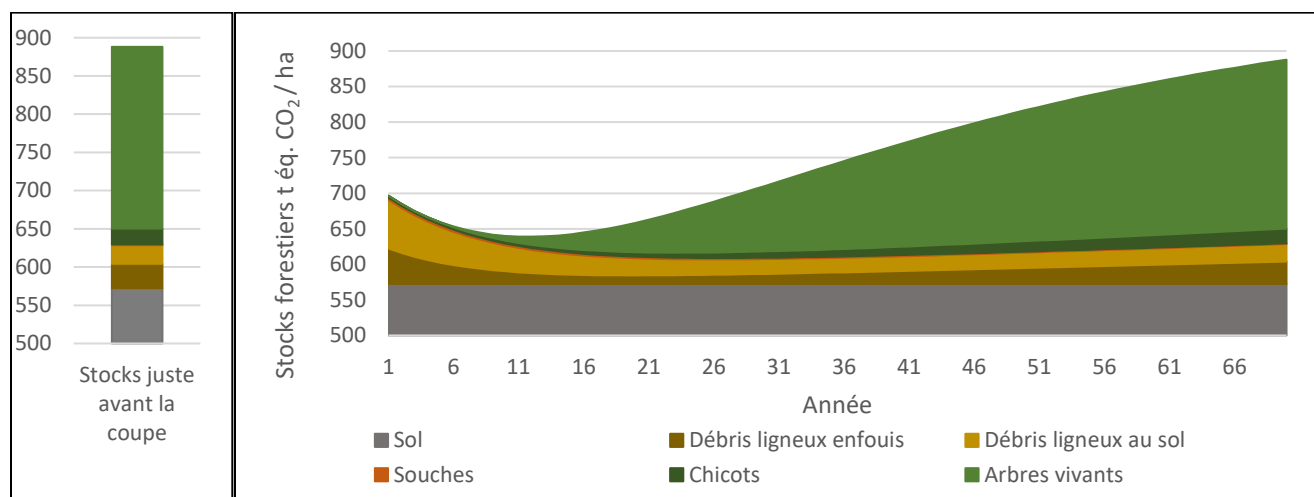


Figure 12. Stocks de carbone en forêt suite à la coupe de 1 hectare de sapinière à bouleau blanc

Note : L'axe des abscisses coupe l'axe des ordonnées à 500 t éq. CO₂.

On peut y 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 causer une accumulation significative de carbone. Ainsi, au total, les stocks de carbone diminuent pendant quelques années suite à la coupe, puis augmentent rapidement lorsque la croissance des arbres devient importante.

La Figure 13 montre les flux annuels associés à l'évolution des stocks forestiers. Un flux annuel représente la différence de stock entre deux années consécutives; une valeur positive de flux annuel indique une baisse de stock; une valeur négative de flux annuel indique une augmentation de stock. Un flux positif représente ainsi une émission de carbone à l'atmosphère; un flux négatif représente une séquestration.

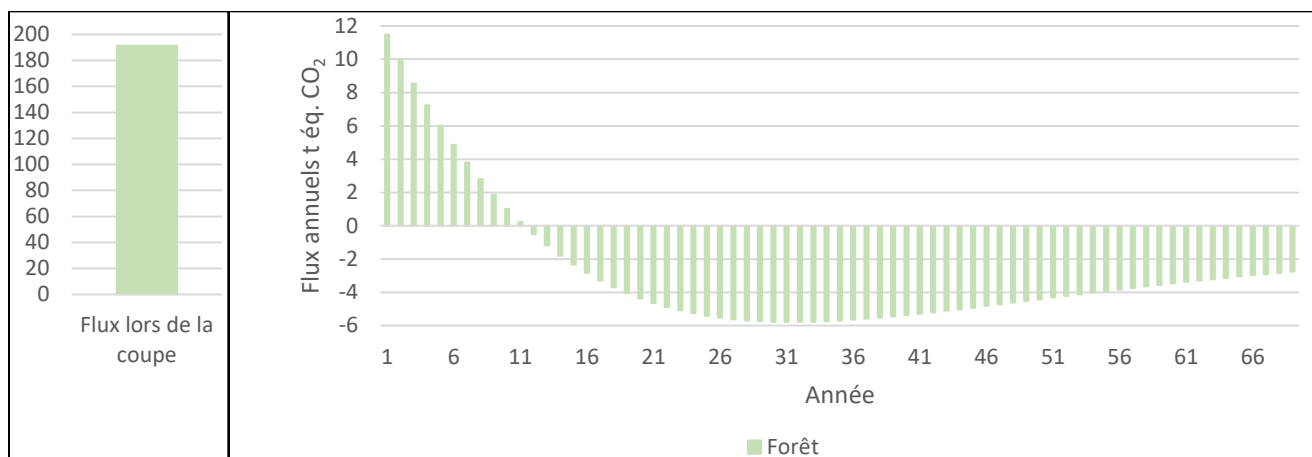


Figure 13. Flux annuels suivant la coupe de 1 hectare supplémentaire de sapinière à bouleau blanc

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES.

On peut voir que dans les premières années suivant la coupe, les flux annuels sont positifs, et représentent donc des émissions à l'atmosphère : la forêt est alors une source d'émissions de GES en raison de la décomposition. Après quelques années, la croissance des arbres qui, par photosynthèse, séquestre du CO₂, devient suffisamment importante pour que la forêt devienne un puits de GES.

Or, les flux en forêt ne représentent qu'une partie des effets du secteur forestier : il faut considérer également les produits du bois issus de la coupe, et leur effet de substitution sur les marchés. En effet, le carbone contenu dans le bois récolté en forêt est transféré en partie dans des produits; ce carbone dans les produits est stocké à plus ou moins long terme selon la durée de vie du produit. D'autre part, en raison de la faible quantité d'émissions de GES générés lors de leur fabrication, l'utilisation des produits du bois permet d'éviter des émissions liées à la production et l'utilisation d'autres matériaux et sources d'énergie (par exemple lorsqu'on substitue du béton ou de l'acier par du bois en construction); c'est ce qu'on appelle la substitution.

Dans notre exemple, on estime que le bois récolté est utilisé à 48 % pour les produits du sciage à longue durée de vie (avec les résidus de sciage étant majoritairement utilisés dans les pâtes et papiers à plus courte durée de vie); les produits du sciage sont utilisés en construction en remplacement de béton et d'acier (avec un facteur de déplacement de 0,91). Les flux du système Forêt – Produits – Substitution au moment de la coupe sont illustrés à la Figure 14.

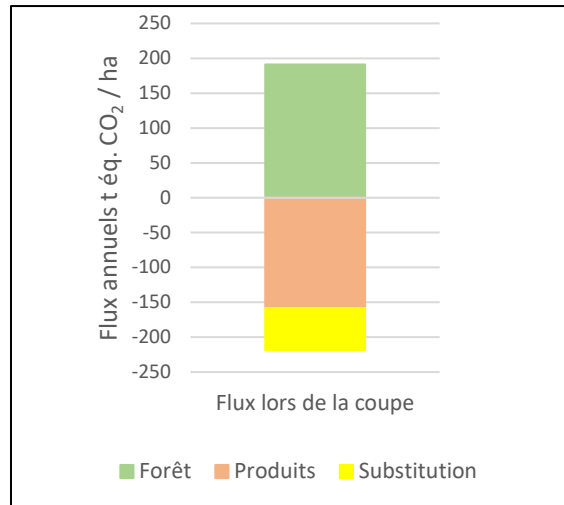


Figure 14. Flux lors de la coupe de 1 hectare supplémentaire de sapinière à bouleau blanc

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES.

On peut voir que les émissions en forêt sont compensées par les flux négatifs des produits (puisqu'il s'agit en fait d'un transfert d'une partie du carbone de la forêt vers les produits) et de leur effet de substitution (émissions évitées sur les marchés).

Les flux négatifs des produits et de la substitution seront d'autant plus grands, et permettront d'autant plus de compenser les émissions en forêt, si :

- le rendement en sciage (et autres produits de longue durée) à partir du bois récolté est élevé;
- les produits du bois sont utilisés de manière ciblée sur les marchés pour substituer des matériaux et sources d'énergie à fortes émissions de GES (voir Encadré 2 pour une discussion sur la substitution des sources d'énergie fossile).

ENCADRÉ 2 : COMMENT LA PRODUCTION DE BIOÉNERGIE PEUT-ELLE CONTRIBUER À L'ATTÉNUATION?

Pour évaluer le bilan carbone de la production de bioénergie à partir de biomasse forestière, il faut tenir compte de deux composantes : d'abord, la dynamique du carbone en forêt, puis la dynamique des émissions de GES lors de la production d'énergie.

La récupération de biomasse sous forme de résidus de coupe totale influence d'abord la dynamique en forêt en réduisant les émissions liées à la décomposition (moins de débris au sol = moins de décomposition aérobie émettant du CO₂) par rapport au cours normal des affaires. Cela est illustré par un exemple représentant les flux annuels liés aux débris après coupe dans une sapinière à bouleau blanc de 1 hectare dans la réserve faunique des Laurentides (Figure 15); le cours normal des affaires représente les flux suite à une coupe totale seulement, en comparaison avec une coupe totale suivie de la récupération d'une partie des résidus de coupe.

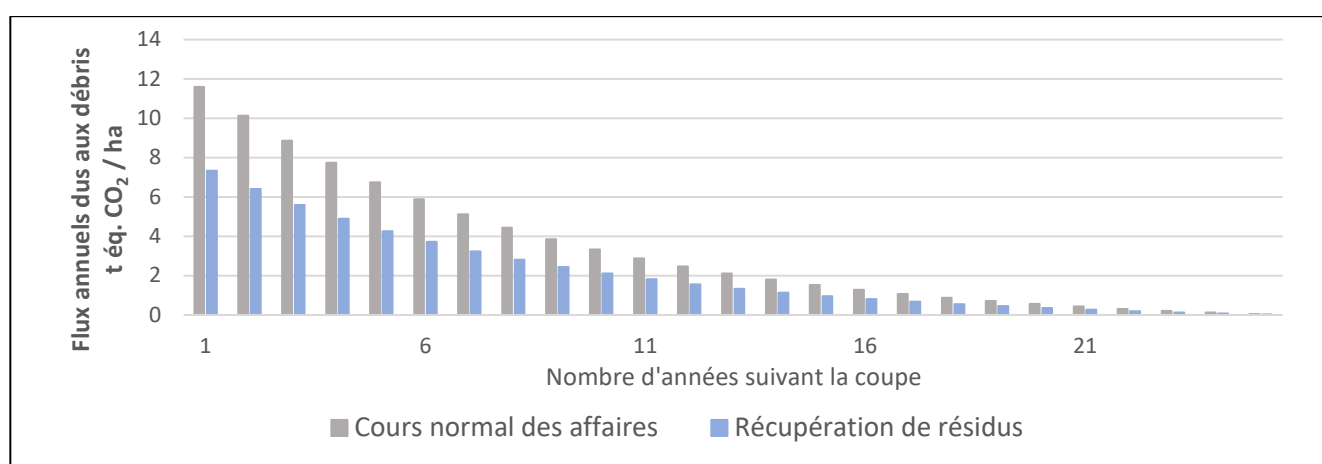


Figure 15. Flux annuels dus aux débris suite à la coupe, sans (cours normal des affaires) et avec récupération des résidus de coupe, pour 1 hectare de sapinière à bouleau blanc

Note : Une valeur positive indique des émissions de GES à l'atmosphère.

Ainsi, la différence de flux annuels pour 1 hectare de forêt suite à la récupération de résidus de coupe par rapport au cours normal des affaires est négative (atténuation nette pour la composante forêt) (Figure 16); cela est particulièrement visible au cours des premières années suite à la coupe. Dans l'exemple utilisé, cette atténuation nette se poursuit sur une période de 26 ans, suite à laquelle les flux annuels en forêt entre le cours normal des affaires et le scénario de récupération des résidus redeviennent les mêmes.

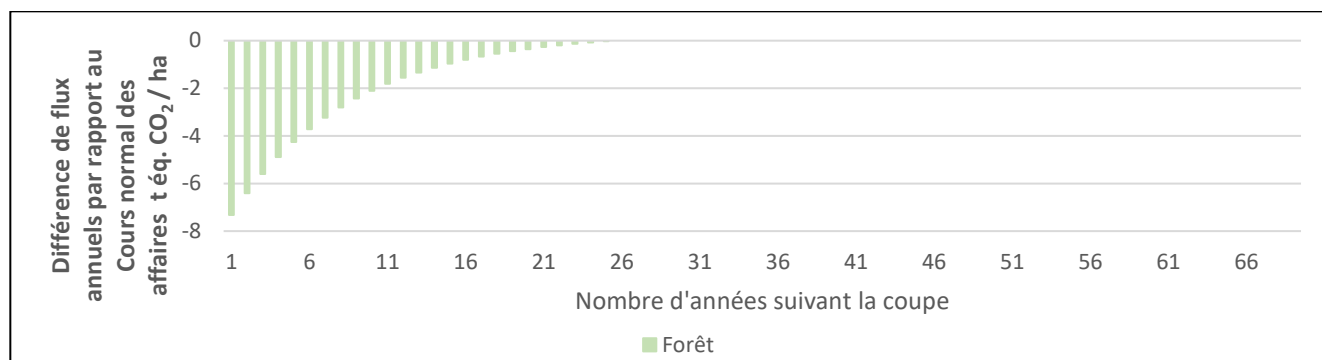


Figure 16. Différence de flux annuels de GES en forêt entre la récupération de résidus de coupe et le Cours normal des affaires, pour 1 hectare de sapinière à bouleau blanc

Note : Une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES.

Si on considère plutôt la récolte de bois sans preneurs issus de peuplements peu productifs et destinés en partie à la bioénergie, la dynamique des flux en forêt va alors s'apparenter à celle de la récolte forestière tel que discuté dans l'Encadré 1.

La biomasse (sous forme de résidus ou arbres sans preneurs) est ensuite utilisée pour la production de bioénergie, en remplacement d'une source d'énergie fossile. La combustion du produit de bioénergie cause une émission à l'atmosphère lors de son utilisation. Le remplacement d'énergie fossile est quant à lui exprimé sous forme d'émissions évitées (effet de substitution), et quantifié avec un facteur de déplacement.

Un facteur de déplacement de 0,43, tel qu'utilisé dans l'analyse de base, indique que pour chaque tonne de éq. CO₂ émise par combustion de bioénergie, une émission de 0,43 t éq. CO₂ provenant d'énergie fossile est évitée. Il s'agit d'une valeur conservatrice qui serait issue, par exemple, d'une substitution du panier énergétique moyen utilisé au Québec, sans égard à la source d'énergie déplacée. Il est bon de rappeler que ce panier énergétique moyen est constitué à 44 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité, éolien et bioénergie). Les programmes gouvernementaux de remplacement exigent des réductions de gaz à effet de serre de sorte que les projets visant l'utilisation de bioénergie pour la chauffe remplacent uniquement des énergies fossiles.

Ainsi, dans un contexte d'une politique de déploiement de la bioénergie visant une substitution ciblée des sources d'énergie fossile les plus polluantes, des valeurs plus élevées sont atteignables. Par exemple, des études réalisées par la Fédération québécoise des coopératives forestières sur l'utilisation de la biomasse forestière pour le chauffage communautaire et industrielle au Québec permettent de calculer un facteur de déplacement de 0,76 pour le remplacement du propane, de 0,95 pour le remplacement du mazout et de 0,99 pour le remplacement du coke de pétrole. En outre, le remplacement de carburants fossiles pour le transport (p. ex. diesel) pourrait permettre d'atteindre des facteurs de déplacement encore plus élevés, de l'ordre de 1,23.

La Figure 17 montre l'effet de la substitution de différentes sources d'énergie fossiles (avec leur facteur de déplacement respectifs) sur le potentiel d'atténuation du scénario de développement de la bioénergie (BIO), par rapport au cours normal des affaires. Ce scénario, appliqué à l'échelle de la forêt commerciale du Québec, prévoit une augmentation de la récolte de résidus par rapport au cours normal des affaires de +0,8 millions de tonnes métriques anhydres par année (Mtma /année) entre 2020 et 2050, et de 2 Mtma /année à partir de 2051 jusqu'en 2089.

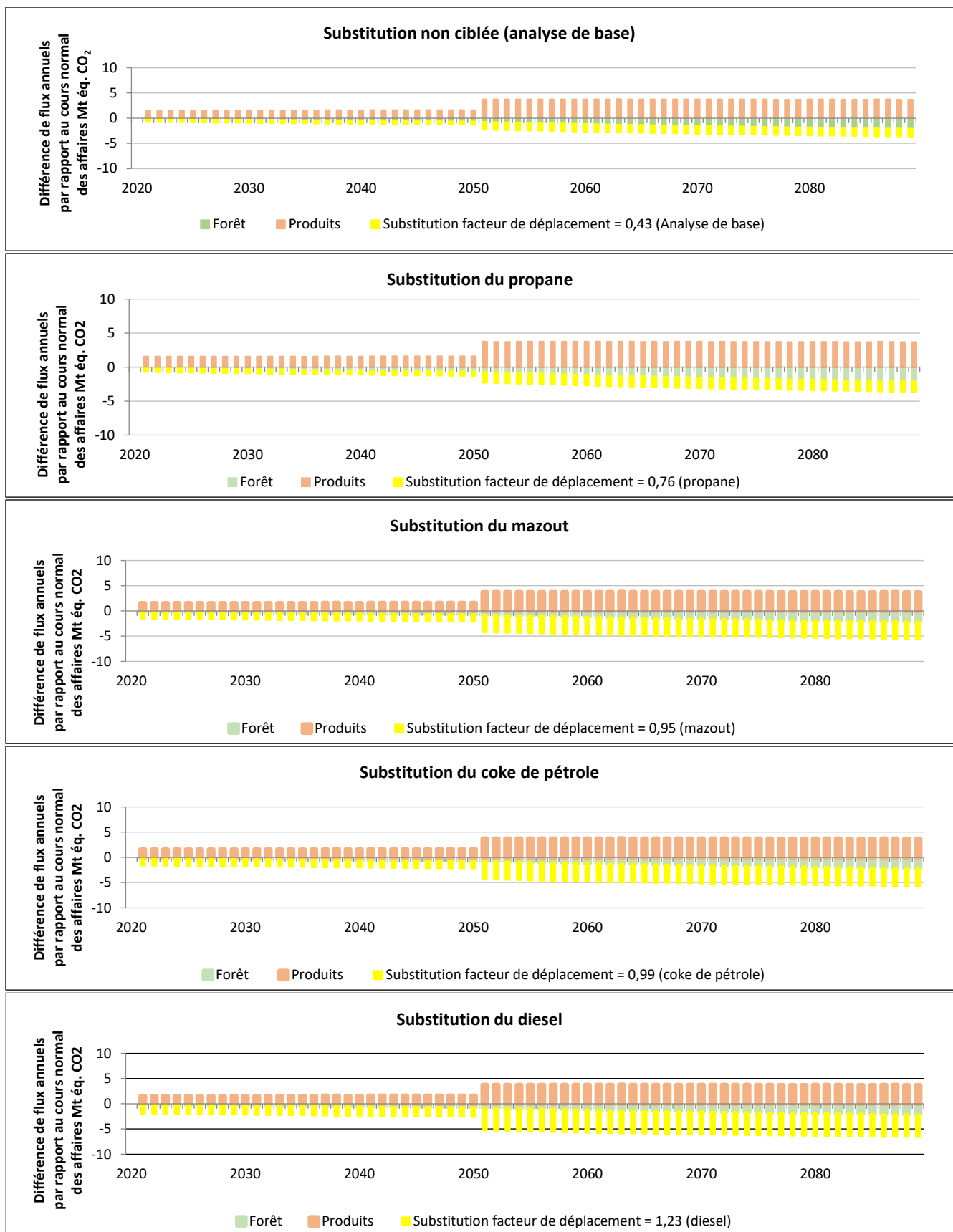


Figure 17. Différence de flux annuels de GES entre le scénario Développement de la bioénergie (BIO) et le cours normal des affaires, en fonction de la source d'énergie fossile substituée

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. Les émissions liées aux produits sont causées par la combustion.

On y voit, d'une part, la différence de flux annuels liés à la forêt et à la combustion de la bioénergie, qui restent identiques peu importe la source d'énergie fossile substituée; l'effet de la substitution est par contre d'autant plus important que le facteur de déplacement est élevé.

La Figure 18 résume le bilan total (Forêt + Produits + Substitution) du scénario de développement de la bioénergie en fonction des différents facteurs de déplacement. On y constate qu'avec un facteur de déplacement de 0,95 ou plus, la bioénergie procure des bénéfices dès la première année de son déploiement. Un facteur plus faible de 0,76 permet quant à lui des bénéfices à partir de 2033.

Un facteur de déplacement élevé est obtenu quand :

- la source d'énergie fossile remplacée a un coefficient d'émissions de GES élevé (le coefficient d'émissions de GES est la quantité de GES émise lors de la combustion par unité d'énergie produite), et des émissions élevées associées à sa production et son transport; et
- la bioénergie a une chaîne de production, de transport et de conversion très efficace et à faible empreinte GES.

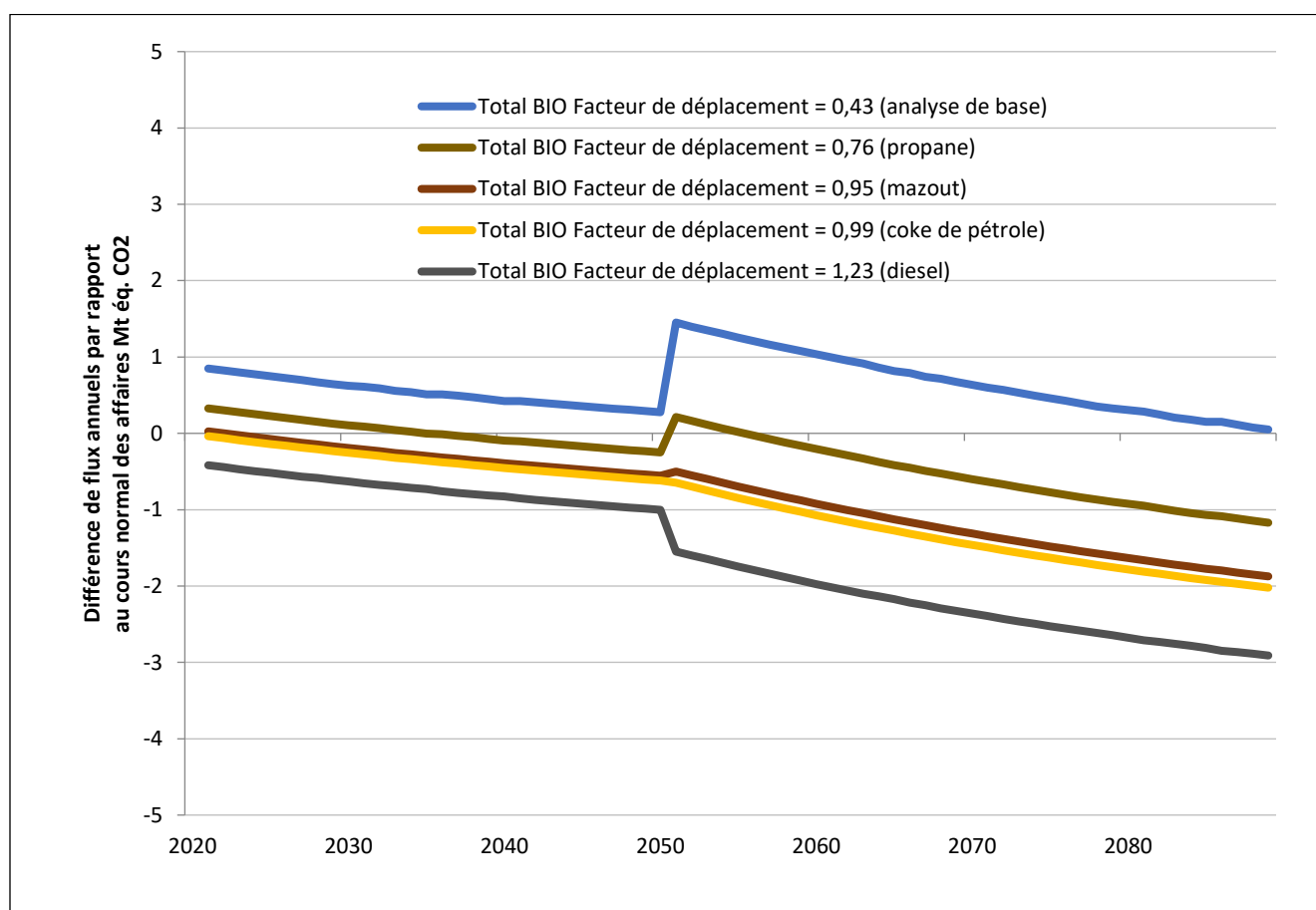


Figure 18. Bilan total de la différence de flux annuels de GES entre le scénario Développement de la bioénergie (BIO) et le cours normal des affaires, en fonction de la source d'énergie fossile substituée

Note : Une valeur positive indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES.

ENCADRÉ 3 : IMPACTS CLIMATIQUES DES ATTÉNUATIONS LIÉES AU SECTEUR FORESTIER

L'impact réel sur le climat des modifications aux flux de GES associés aux différentes actions mériterait d'être considéré. En effet, la simple comptabilisation des émissions néglige l'effet réchauffant des GES accumulés dans l'atmosphère à travers le temps et ne permet pas nécessairement d'identifier le potentiel d'atténuation effectif du réchauffement climatique de pratiques de foresterie [19]. Le forçage radiatif prend en compte la distribution temporelle des émissions de GES et fournit une estimation du réchauffement du climat causée par une pratique donnée [20,21].

Le Tableau 3 et les Figure 19 et Figure 20 montrent les impacts cumulatifs en termes de forçage radiatif (tel que calculé avec le modèle DynCO₂ [20]) des différents scénarios d'atténuation (analyse de base et analyse de sensibilité incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée; voir section Méthodologie pour le détail de ces actions), par rapport au cours normal des affaires. La différence de forçage radiatif est exprimée en watts par m² de surface terrestre; une valeur positive représente un effet de réchauffement par rapport au cours normal des affaires, et une valeur négative représente un effet de refroidissement.

Dans l'analyse de base, le scénario d'intensification de l'aménagement forestier et de développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP) procure des bénéfices de manière définitive à partir de l'année 2076 lorsque considéré avec le forçage radiatif cumulatif. En ce qui a trait aux scénarios INT et INT+BIO, les premières atténuations se manifestent aux années 2020. Le scénario BIO ne présente pas d'atténuation dans l'analyse de base. Dans l'analyse de sensibilité tenant compte d'une transition industrielle accélérée et des substitutions ciblées, les atténuations se présentent dès l'année 2020 pour tous les scénarios. Les actions qui causent des émissions lors des premières années ont un effet réchauffant. À l'inverse, celles qui permettent de réduire rapidement les émissions dès les premières années de déploiement procurent un effet refroidissant important. Notamment, une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée sur les marchés (telle que simulées dans l'analyse de sensibilité) permettent un plus grand stockage de CO₂ dans les produits de longue durée et un évitement accru d'émissions de GES en provenance des industries des matériaux et des énergies fossiles substitués par le bois. De telles mesures, si elles sont déployées le plus rapidement possible, permettent aux scénarios d'augmentation de la récolte et de la production de bois de procurer des bénéfices climatiques dès les premières décennies.

Tableau 3. Différence de forçage radiatif cumulatif entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base, et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m²

	2020-2030		2031-2050		2051-2089	
	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité
INT	-1,1E-04	-2,2E-04	-1,0E-03	-2,2E-03	-3,6E-03	-1,0E-02
BIO	6,2E-05	-3,4E-05	3,0E-04	-3,2E-04	1,5E-03	-2,5E-03
INT+BIO	-4,9E-05	-2,5E-04	-7,2E-04	-2,5E-03	-2,2E-03	-1,3E-02
INT+BIO+RBSP	-1,1E-04	-4,4E-04	-7,5E-06	-3,2E-03	-1,7E-03	-1,8E-02

Note : Une valeur positive indique un effet de réchauffement du climat; une valeur négative indique un effet de refroidissement du climat. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

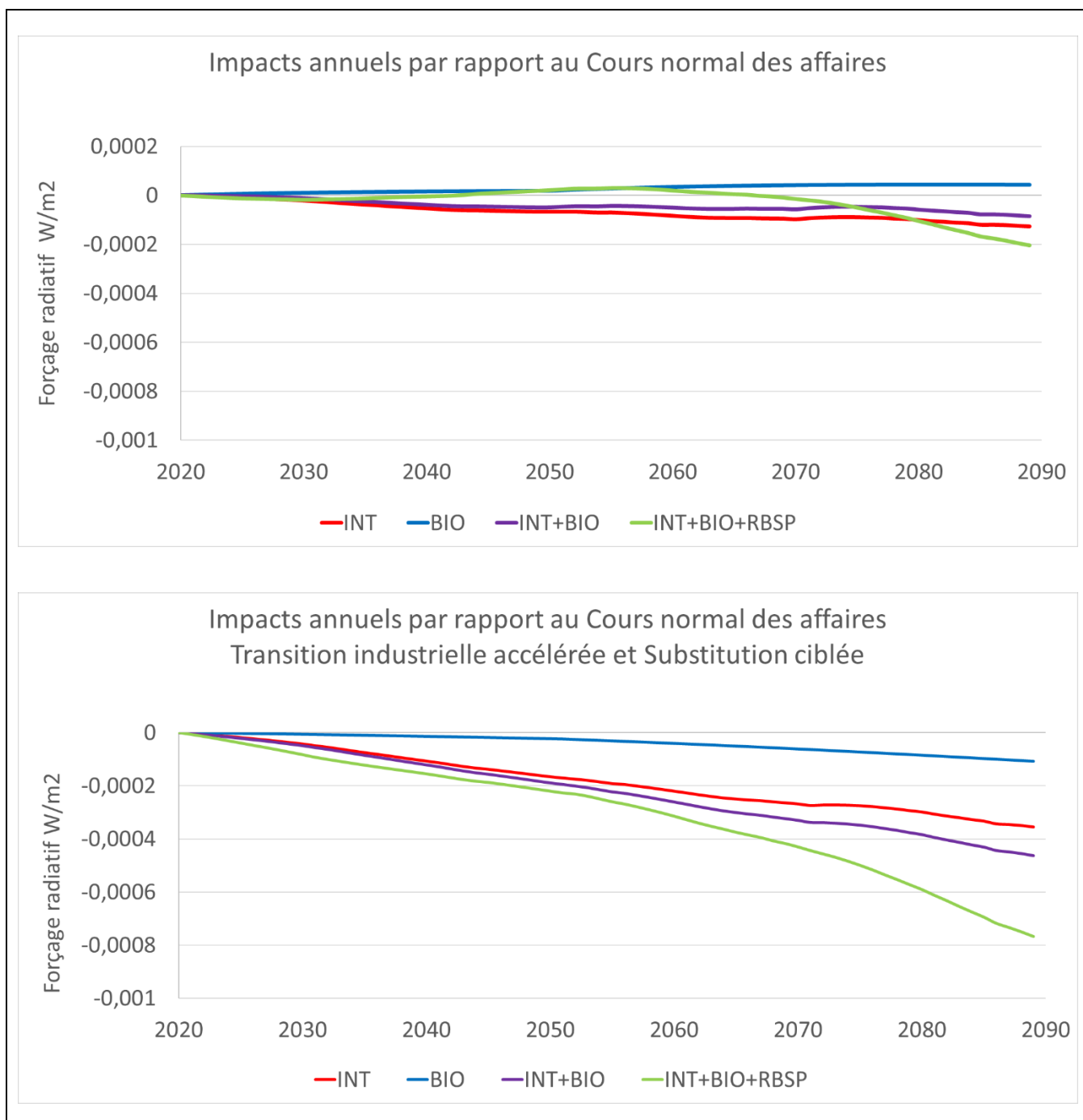


Figure 19. Différence de forçage radiatif annuel entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m²

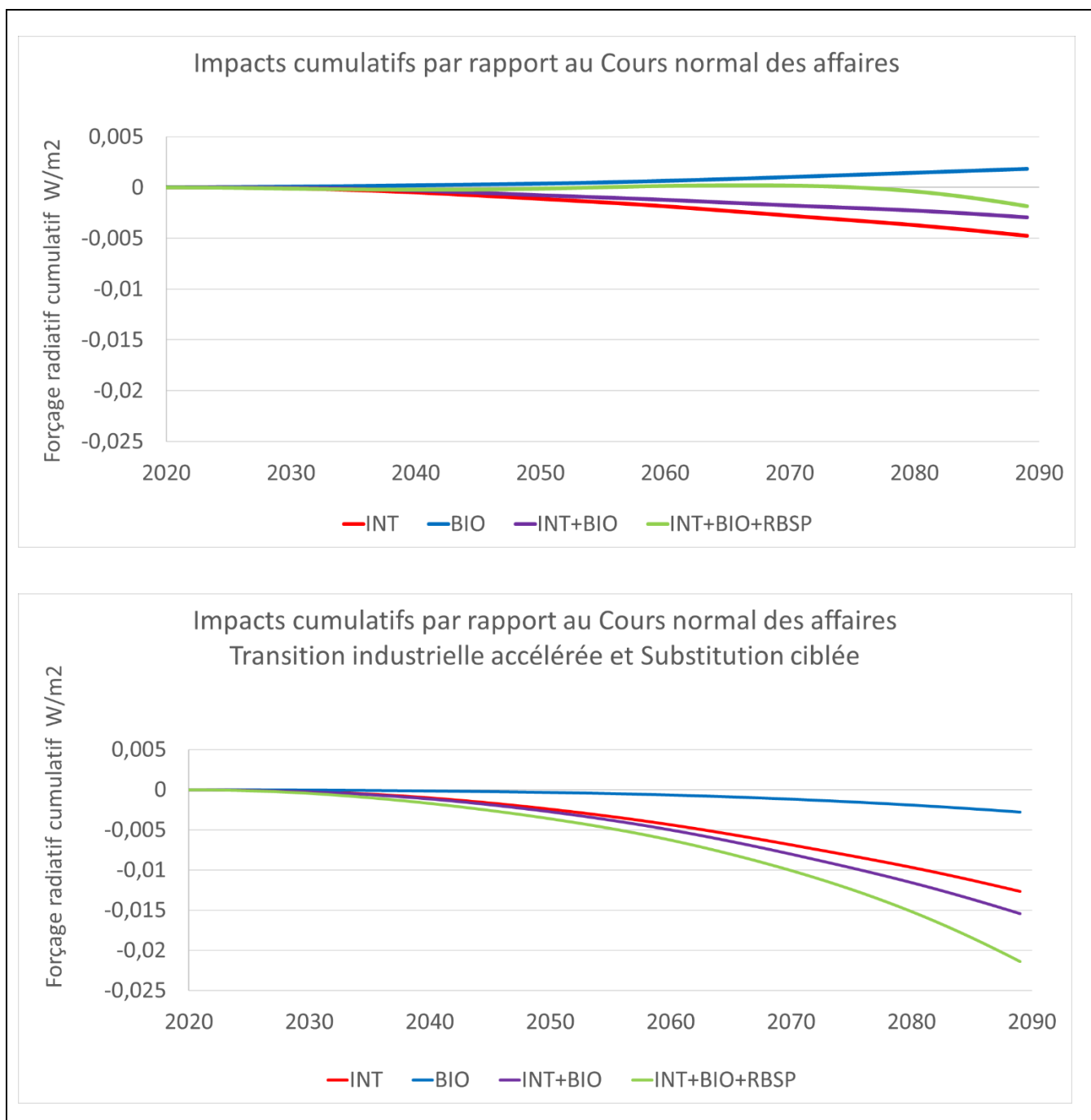


Figure 20. Différence de forçage radiatif cumulatif entre les scénarios et le cours normal des affaires, selon l'analyse de base et l'analyse de sensibilité (Transition industrielle accélérée et Substitution ciblée) en W/m^2

Par ailleurs, des phénomènes autres que les émissions de GES peuvent également influencer le réchauffement planétaire (p. ex. présence d'oxydes nitreux, de suie de carbone, de composés organiques volatiles, l'humidité atmosphérique, les effets d'albédo, etc.) [22]. La décision d'évaluer le potentiel d'atténuation du secteur forestier sur la seule base des tonnes de $eq. CO_2$ reste tout de même pertinente dans le contexte actuel puisqu'il s'agit de la base de référence des inventaires de GES.

Impacts financiers et économiques

Le Tableau 4 et la Figure 21 résument l'ensemble des résultats de l'analyse financière et économique pour la période 2020-2089. Sur la Figure 21, la fourchette de valeurs d'atténuation pour chaque scénario représente l'étendue des résultats pour l'analyse de base et l'analyse de sensibilité : la limite supérieure de chaque barre représente le résultat de l'analyse de base, alors que la limite inférieure (la plus grande valeur négative) est obtenue en ajoutant l'effet d'une transition industrielle accélérée et d'une substitution ciblée (analyse de sensibilité). Les coûts d'atténuation sont évalués à partir du revenu net marginal sur la période 2020-2089 et des atténuations cumulatives exprimées en Mt éq. CO₂ pour chacune des analyses la même période. La valeur moyenne pour chaque scénario est présentée à titre de référence.

Tableau 4. Résumé des analyses du potentiel d'atténuation des scénarios étudiés, incluant les analyses de sensibilité, de l'analyse financière et de l'analyse économique

Note : Base : scénarios de base. Sensibilité : scénarios incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée. Les valeurs négatives indiquent A) une atténuation nette des émissions de GES, B) un revenu d'atténuation ou C) une baisse de valeur.

Scénarios	INT		BIO		INT+BIO		INT+BIO+RBSP	
	Intensification de l'aménagement		Développement de la bioénergie		Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie		Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte de bois sans preneurs	
A) Potentiel d'atténuation (Mt éq. CO ₂)								
	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité
Atténuations cumulatives 2020-2030	-16	-35	8	-5	-8	-40	-14	-67
Atténuations cumulatives 2020-2050	-59	-144	17	-20	-42	-164	12	-195
Atténuations cumulatives 2020-2089	-127	-357	46	-102	-81	-459	-160	-732
Atténuation annuelle moyenne 2020-2089 ²	-1,8 Mt éq. CO ₂ / année	-5,2 Mt éq. CO ₂ / année	0,7 Mt éq. CO ₂ / année	-1,5 Mt éq. CO ₂ / année	-1,2 Mt éq. CO ₂ / année	-6,6 Mt éq. CO ₂ / année	-2,3 Mt éq. CO ₂ / année	-10,4 Mt éq. CO ₂ / année
B) Analyse financière (G\$ actualisés) ³								
Coûts d'aménagement forestier additionnels 2020-2089 ⁴	9,6		2,5		12,2		40,2	
Revenu net marginal 2020-2089 ⁵	-1,4		0,3		-1,1		-13,1	
Coûts d'atténuation 2020-2089	5,58\$/t éq. CO ₂	15,34\$/t éq. CO ₂	n/a	-4,31\$/t éq. CO ₂	3,53\$/t éq. CO ₂	19,44\$/t éq. CO ₂	27,05\$/t éq. CO ₂	147,01\$/t éq. CO ₂
Coût moyen d'atténuation 2020-2089 ⁶	10,46\$/t éq. CO ₂		-4,31\$/t éq. CO ₂		11,49\$/t éq. CO ₂		87,03\$/t éq. CO ₂	
C) Analyse économique (G\$ actualisés)								
Valeur actuelle nette économique 2020-2089	13,2		0,2		6,0		17,3	

² Valeurs non actualisées.

³ Les coûts comptabilisés dans le revenu net marginal excluent les investissements en capitaux pour de nouvelles usines ou des conversions d'usines.

⁴ Valeurs identiques pour l'analyse de base et l'analyse de sensibilité. Les données sont actualisées.

⁵ Le revenu net marginal est identique pour les analyses de base et de sensibilité. Les coûts sous-jacents au revenu net excluent les coûts d'infrastructure, investissements en capitaux et coûts relatifs au développement et l'implantation de politiques et/ou réglementations.

⁶ Moyenne entre analyse de base et analyse de sensibilité; basée sur les valeurs actualisées du potentiel d'atténuation (taux de 1 %) et des flux financiers (taux de 3 %).

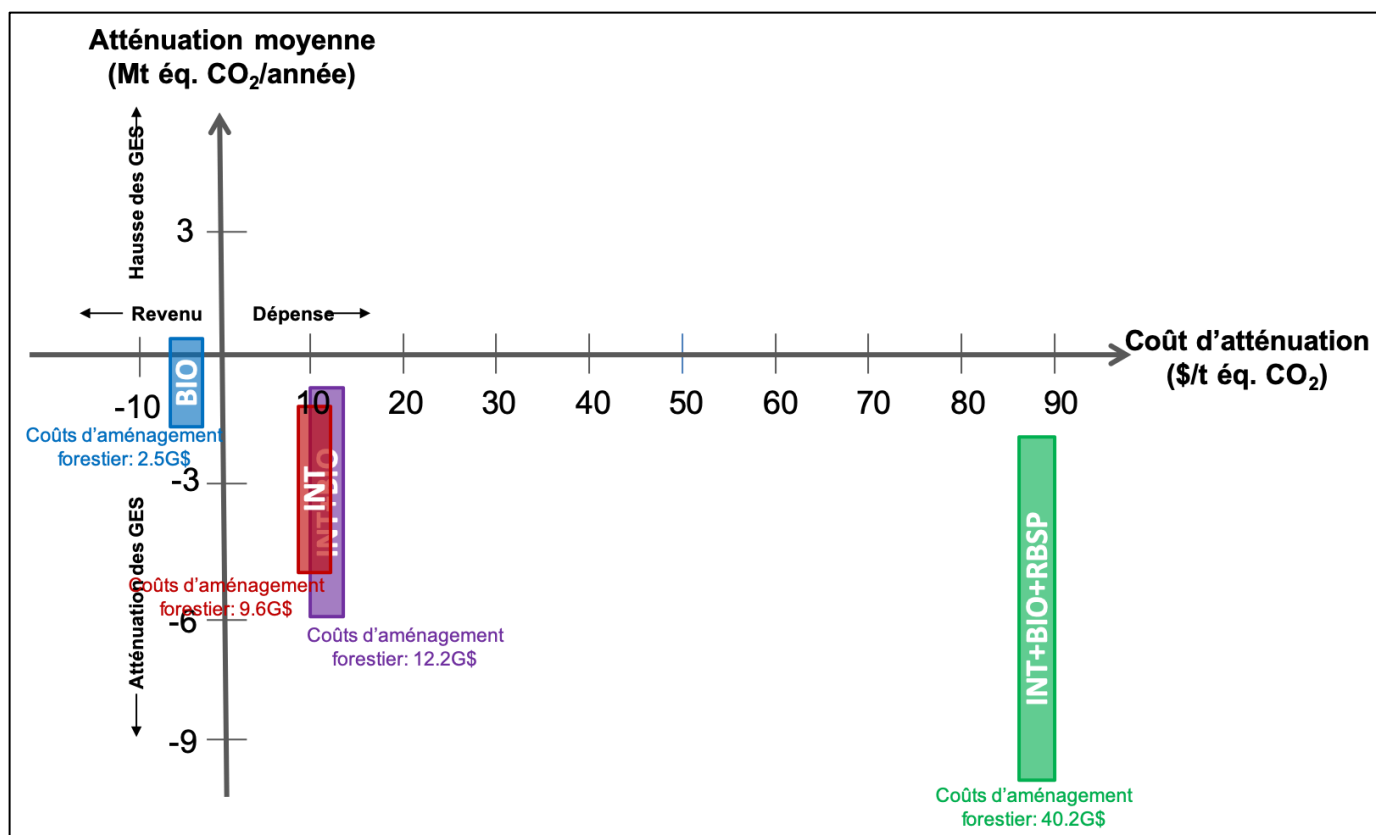


Figure 21. Potentiel, coûts d'atténuation moyens et coûts d'aménagement forestier des scénarios de base et des analyses de sensibilité pour la période 2020-2089

Note : Le potentiel d'atténuation est représenté par l'étendue des valeurs issue de l'analyse de base et des analyses de sensibilité. Une valeur positive de potentiel d'atténuation indique une augmentation nette des émissions de GES à l'atmosphère; une valeur négative indique une atténuation nette des émissions de GES. Une valeur positive du coût d'atténuation indique une dépense, une valeur négative indique un revenu. INT : Intensification de l'aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

Le coût moyen d'atténuation des scénarios Intensification de l'aménagement sans (INT) et avec développement de la bioénergie (INT+BIO) s'établissent respectivement à 10,46\$ et 11,49\$/tonne éq. CO₂. Le scénario d'intensification et de développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP) a un coût beaucoup plus élevé que les trois autres scénarios (coût de 87,03\$/tonne éq. CO₂). Le scénario de développement de la bioénergie offre quant à lui des coûts d'atténuation de -4,31\$/tonne éq. CO₂ (valeur négative = revenu d'atténuation) en raison de revenus nets plus élevés que ceux du cours normal des affaires.

Le développement de la bioénergie présente le plus faible potentiel d'atténuation. Par contre, comme mentionné précédemment, le facteur de déplacement attribuable à la bioénergie utilisé dans l'analyse de base de l'étude est conservateur. Les bénéfices d'atténuation de la bioénergie augmentent en fonction de l'efficacité de la substitution des énergies fossiles (voir Encadré 2). Dans le cas d'une substitution ciblant des énergies fossiles à forte intensité de GES (telle que soutenue par les programmes actuellement en vigueur), les bénéfices de la bioénergie croissent en proportion de la quantité de résidus récupérés et utilisés pour la bioénergie et en fonction des sources d'énergie fossile remplacées. Dans ce contexte, le développement de la bioénergie peut permettre d'atténuer les émissions de GES à faible coût et présente même la possibilité de générer un revenu.

Les actions d'intensification procurent des bénéfices d'atténuation élevés. D'abord, le programme de boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers (500 000 ha en 10 ans) déployé dès les premières

années, et qui permet d'augmenter les superficies sous aménagement, offre des atténuations cumulatives de -26,8 Mt éq. CO₂ en 2050, et -36,1 Mt éq. CO₂ en 2089.

La mise en marché de produits du bois de longue durée, issus d'une augmentation de la récolte et d'une amélioration du rendement des scieries, couplée à des efforts de reboisement assurant la régénération des aires de coupe, fournissent ensuite des bénéfices croissants. Cela est visible particulièrement à partir de 2040, permettant la plus grande atténuation d'ici 2089. L'analyse de sensibilité montre que l'efficacité des actions d'aménagement croît de manière importante lorsque des mesures permettent d'augmenter le rendement matière des scieries et lorsque les produits du bois et la bioénergie sont utilisés prioritairement pour la substitution ciblée de matériaux ou énergies à forte intensité de GES. Le potentiel d'atténuation de l'action d'intensification avec récolte de bois sans preneurs ne se réalise pleinement qu'après 2050 (notamment en raison de l'effet d'une récolte accrue sur les stocks de carbone dans les premières années suivant la coupe; voir Encadré 1). Au-delà de cette date, les bénéfices d'atténuation de cette mesure croissent régulièrement.

Il est important de noter que les bénéfices d'atténuation sont associés à des investissements significatifs. Ainsi, la valeur actualisée des coûts d'aménagement forestier additionnels requis pour atteindre les potentiels d'atténuation sur la période 2020-2089 croît en fonction de l'ampleur des mesures déployées : ces coûts varient de 2,5 G\$ pour le scénario de développement de la bioénergie, qui n'implique que la récupération de résidus de coupe, à 9,6 et 12,2 G\$ pour les actions d'intensification sans et avec bioénergie, et à 40,2 G\$ lorsqu'on y ajoute la récolte des bois sans preneurs et les coûts sylvicoles associés aux plus grandes superficies pouvant ainsi être traitées.

Le Tableau 4 présente également les résultats de l'analyse économique, qui s'intéresse aux revenus économiques et au coût total (investissements et coût d'opportunité) pour tous les agents économiques de la société. Cette analyse indique que tous les scénarios procurent des revenus économiques par rapport au cours normal des affaires, atteignant 17,3 G\$ sur la période 2020-2089 pour le scénario d'Intensification de l'aménagement et de développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP). C'est donc dire que les mesures d'aménagement comme le boisement, le reboisement et la récolte de bois procurent des bénéfices économiques importants pour la société.

Développement de la bioénergie (BIO)

De tous les scénarios, le développement de la bioénergie est le seul procurant des revenus marginaux relativement au cours normal des affaires. Une politique de remplacements ciblés des énergies fossiles est cependant nécessaire pour permettre d'atteindre des facteurs de déplacement élevés et procurer des bénéfices en termes d'atténuation (voir Encadré 2). Les politiques actuelles visent déjà de tels remplacements.

Intensification de l'aménagement (INT)

Dans l'analyse de base, le potentiel d'atténuation des trois scénarios comportant l'intensification de l'aménagement sont assez rapprochés (INT, INT+BIO, INT+BIO+RBSP). Les différences entre ces trois scénarios tiennent à leur coût actualisé, au coût d'atténuation par tonne, ainsi qu'à la variabilité entre les effets estimés dans l'analyse de base et l'analyse de sensibilité. Parmi ces scénarios, celui avec l'intensification seulement (INT) présente les coûts d'aménagement actualisés les plus faibles. Ensemble, ces résultats supportent le virage vers l'intensification amorcé avec le projet de stratégie nationale de production de bois du Québec.

Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie (INT+BIO)

Ce scénario supporte l'idée que la bioénergie (en remplacement d'énergie fossile à forte empreinte carbone) doit être associée à l'intensification de l'aménagement pour procurer des bénéfices importants d'atténuation. Ces derniers peuvent dépasser ceux de l'intensification seule dans la mesure où la bioénergie est utilisée de manière ciblée (atténuations cumulatives supplémentaires de -102 Mt éq. CO₂ sur 2020-2089), à un coût moyen de 11,49\$/t éq. CO₂ pour la période 2020-2089 (soit 1,03\$/t éq. CO₂ de plus). Le scénario INT+BIO commande cependant un coût actualisé d'aménagement forestier de 25 % supérieur à l'intensification seule.

Intensification de l'aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs (INT+BIO+RBSP)

En dépit de coûts d'aménagement quatre fois supérieurs à l'intensification seule (40,2 G\$ en valeur actuelle nette en comparaison du cours normal des affaires), cette stratégie procure des atténuations jusqu'à deux fois plus élevées que les scénarios qui n'incluent pas de récolte des bois sans preneurs. Par contre, l'hypothèse nécessaire à la réalisation de ce scénario consiste à la création de débouchés économiques pour de grands volumes de bois actuellement sans preneurs. Ce scénario nécessite donc, pour sa réalisation, un effort de R&D pour la mise en valeur des bois sans preneurs via la filière de la bioénergie et celle des matériaux composites destinés à la construction. La réalisation de ce scénario nécessite également l'élaboration de stratégies de financement ambitieuses, les coûts d'aménagement devenant extrêmement élevés. Les stratégies mises en place sont certes plus ambitieuses, mais l'atténuation de ce scénario est assortie de bénéfices économiques plus importants. Considérant la faible valeur actuelle des bois sans preneurs, le coût d'atténuation devient plus important que les autres scénarios, à 87,03\$/t éq. CO₂ évitée pour la période 2020-2089.

Conclusion

En somme, la possibilité de revenus par tonne atténuée est associée à des investissements importants requis pour le déploiement des actions d'atténuation. Il est à noter que les coûts d'aménagement forestier, les coûts de production des produits, les revenus découlant de l'aménagement forestier et les revenus de produits ne sont pas assumés par les mêmes parties prenantes. Par conséquent, il ne faut pas conclure que la mise en place de ces scénarios devrait s'exécuter naturellement en fonction d'une logique d'affaires établie. Au contraire, la répartition des coûts et des revenus entre l'industrie et l'État souligne la nécessité d'harmoniser les politiques (énergétiques, industrielles, autres) et les plans d'aménagement de façon à obtenir les rendements financiers, forestiers et environnementaux identifiés. Il est à considérer également que les revenus potentiels liés aux marchés du carbone ne sont pas pris en considération dans la présente analyse, mais pourraient rendre possible l'opérationnalisation d'actions d'atténuation qui seraient plus difficilement réalisables autrement. Cela est d'autant plus vrai que les coûts calculés ici sont relativement bas, considérant l'évolution prévisible du prix de la tonne éq. CO₂ dans le contexte canadien de tarification du carbone et dans le cadre du marché du carbone nord-américain auquel participe le Québec (WCI).

LIMITES DE L'ÉTUDE ET AUTRES CONSIDÉRATIONS

Équivalence des mécanismes de séquestration et de réduction

Une des limites de l'approche de modélisation utilisée dans le cadre de ce mandat touche d'abord au fait que les mécanismes de séquestration de carbone par les forêts soient traités de manière équivalente aux mécanismes de réduction des émissions de GES par la substitution sur les marchés. Or, le CO₂ séquestré n'est pas stocké de manière permanente [23] et n'est pas, pour cette raison, comparable à des émissions de CO₂ évitées. L'addition des effets de séquestration et de réduction est toutefois une approche acceptée et utilisée dans la littérature scientifique et technique [24].

Le GIEC mentionne que les réductions d'émissions seules, quoique absolument essentielles, ne sauraient suffire à une stratégie d'atténuation efficace; les réductions nettes doivent être minimisées, en mettant en œuvre notamment les émissions négatives des terres forestières [1]. L'évolution dans les pratiques mondiales de comptabilisation du potentiel d'atténuation des forêts et des produits du bois devrait néanmoins faire l'objet d'un suivi, incluant l'évaluation de mesures de prévention et d'atténuation des risques d'inversion des stocks de carbone.

Effet de substitution

L'effet de substitution sur les marchés créé par les produits du bois s'avère un bénéfice très important de la mobilisation du secteur forestier. Dans le cadre du présent mandat, comme dans la plupart des études semblables publiées dans la littérature scientifique [24-26], la substitution est quantifiée avec des facteurs de déplacement qui restent stables tout au long de l'horizon de simulation.

Or, l'effet de substitution ainsi quantifié vient avec des mises en garde. D'abord, l'effet de substitution ne se réalise que si la proportion occupée par le produit du bois pour un service donné par rapport à l'ensemble des matériaux ou énergies utilisés pour ce service (par exemple, la part occupée par le bois en construction par rapport à l'ensemble des matériaux de construction), augmente en raison de la hausse de la disponibilité du produit du bois. À l'inverse, l'effet de substitution est nul si la proportion occupée par le produit du bois pour ce service reste constante; cela pourrait être le cas si la hausse de la disponibilité du produit du bois ne fasse qu'alimenter une augmentation de la demande en construction et en énergie sans changement dans la proportion de bois utilisé pour ces services. Par exemple, une étude en Norvège a évalué que dans ce pays, l'effet de substitution par les produits du sciage et des panneaux se réalisait dans une proportion de 68 et 72 %, respectivement [27].

Ensuite, il est probable que les industries produisant les matériaux et les énergies que l'on vise à remplacer par le bois (p. ex. béton, acier, carburants fossiles) chercheront à améliorer leur empreinte carbone au cours des prochaines décennies, par exemple en réduisant les émissions liées à leurs activités de production. De telles améliorations affecteront les facteurs de déplacement utilisés dans l'étude du bilan carbone du secteur forestier. Pour réaliser son plein potentiel d'atténuation, cela signifie que le secteur forestier devra également viser une amélioration continue de l'efficacité de ses procédés.

Ainsi, il est essentiel, pour le décideur public, de situer le potentiel d'atténuation du secteur forestier dans le contexte plus large de l'offre et la demande en matériaux et en énergie et des autres secteurs industriels qui y sont associés.

Inventaire québécois des GES

Dans le cadre de ce mandat, la comptabilisation des flux de GES comprend les flux provenant des forêts, des produits du bois et leur effet de substitution sur les marchés, incluant les produits exportés hors des frontières du Québec, et peu importe le pays de provenance des produits remplacés au Québec. Cette approche permet d'évaluer la contribution du secteur forestier québécois à la lutte aux changements climatiques à l'échelle mondiale, et non dans les limites de l'Inventaire québécois des GES.

L'impact des actions simulées dans le cadre du mandat se manifesterait dans l'Inventaire québécois de GES par le remplacement de sources d'énergie fossile par la bioénergie et par une réduction de la production industrielle québécoise de béton, d'acier, etc., au profit d'une production accrue de produits du bois. Or, le Québec exporte une partie des produits du bois issus de son territoire et il importe des matériaux et des produits énergétiques dont les émissions de fabrication sont comptabilisées dans le pays d'origine. La part des émissions attribuable aux matériaux importés qui serait remplacée par des produits de bois québécois n'entraînera pas de réductions d'émissions de GES dans l'Inventaire québécois de GES. Une évaluation de l'effet d'une augmentation de la présence des produits du bois issus du Québec sur l'Inventaire de GES de la province nécessiterait une analyse détaillée des flux actuels et projetés de l'offre et de la demande domestiques et internationales en matériaux et en énergie. Une analyse simplifiée est effectuée ici.

En ce qui concerne le béton et l'acier, des estimations effectuées à partir des données commerciales fournies par le ministère de l'Économie, des Sciences et de l'Innovation et de l'Institut de la statistique du Québec suggèrent qu'une part croissante de la demande domestique est remplie par des produits importés. Entre 1990 et 2015, 25 % de la demande d'acier et 9 % de la demande de béton était comblée par des importations. Par contre, des variations annuelles importantes existent : sur la période 1990-2015, on note une oscillation de 9 % à 28 % de la proportion de béton et acier importés, avec une valeur moyenne de 17,3 % pour ces deux industries mises ensemble. Il est approprié de réitérer que le remplacement de produits fabriqués en dehors du Québec n'a pas d'incidence sur l'Inventaire québécois de GES.

Ainsi, si on alloue 17,3 % des émissions du béton et de l'acier substituées aux importations, pour chaque tonne de GES déplacée en raison d'une plus grande utilisation du bois en sol québécois, seulement 0,827 tonne (1 tonne * (100 %-17,3 %)) sera effectivement réduite dans le périmètre d'inventaire GES du Québec.

Par contre, il est possible qu'une diminution de la demande québécoise pour des produits de béton et acier n'entraîne pas une baisse de la production québécoise de ces produits, mais simplement un déplacement des ventes des manufacturiers québécois vers d'autres marchés. Il y a ainsi un risque de fuite; pour tenir compte de ce risque, un facteur d'incertitude devrait être ajouté à l'analyse, estimé à 40 % dans le cadre du présent mandat. Ce facteur permet de prendre en compte la capacité des usines québécoises de développer des marchés et ententes, soit dans le marché local ou sur les marchés d'exportations.

Ainsi, si on alloue 17,3 % des émissions du béton et de l'acier substitués aux importations et qu'on tient compte d'un facteur d'incertitude de 40 %, on obtient le calcul suivant :

Pour chaque tonne de GES déplacée en raison d'une plus grande utilisation du bois en sol québécois
 $1 \text{ tonne} * (100 \%-17,3 \%) * (100 \%-40 \%) = 0,50 \text{ tonne}$ de GES serait effectivement réduite dans le périmètre d'inventaire GES du Québec.

La même logique est appliquée à la bioénergie qui entraîne des baisses d'émissions de GES issues de la combustion des énergies fossiles. Le facteur de correction pour la bioénergie tient compte de la part des émissions totales attribuables à l'extraction et la fabrication (qui se produisent à l'extérieur du Québec), estimée à 20 %, ainsi qu'un

risque de fuite de 10 %. Le facteur de correction appliqué est ainsi de $(100\% - 20\%) * (100\% - 10\%)$: 0,72 tonne de GES serait effectivement réduite dans le périmètre d’inventaire québécois de GES.

Le Tableau 5 présente l’impact de chaque scénario d’atténuation sur l’inventaire québécois de GES aux échéances 2030, 2050 et 2089, tant pour l’analyse de base que pour l’analyse de sensibilité.

Pour l’analyse de base, on y note une contribution pouvant atteindre entre -0,5 et -3,0 Mt éq. CO₂ en 2030, et -1,6 à -4,1 Mt éq. CO₂ en 2050. Dans un contexte de transition industrielle accélérée et de substitution ciblée sur les marchés (analyse de sensibilité), la contribution peut atteindre de -1,3 à -6,5 Mt éq. CO₂ en 2030, et de -3,2 à -8,5 Mt éq. CO₂ en 2050.

Tableau 5. Atténuations annuelles par rapport au cours normal des affaires captées dans l’inventaire québécois de GES

Scénarios	Mt éq. CO ₂					
	2030		2050		2089	
	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité	Base	Sensibilité
INT	-0,5	-1,3	-1,6	-3,2	-2,2	-3,8
BIO	0,0	-1,4	-0,1	-1,3	0,0	-3,1
INT+BIO	-1,0	-2,7	-2,1	-4,5	-3,4	-6,9
INT+BIO+RBSP	-3,0	-6,5	-4,1	-8,5	-5,5	-10,9

Note : Base : scénarios de base. Sensibilité : scénarios incluant une transition industrielle accélérée et une substitution ciblée. Une valeur négative indique une atténuation nette. INT : Intensification de l’aménagement; BIO : Développement de la bioénergie; INT+BIO : Intensification de l’aménagement et développement de la bioénergie; INT+BIO+RBSP : Intensification de l’aménagement et développement de la bioénergie incluant la récolte des bois sans preneurs.

Dynamique du carbone en forêt

Une autre limite de l’approche de modélisation utilisée tient à la représentation de la dynamique du carbone dans le bois mort et les sols dans CBM-CFS3, qui reflète de manière encore imparfaite les processus écologiques propres aux forêts québécoises. Les conséquences de cette limite pour l’évaluation du potentiel d’atténuation du secteur forestier sont difficiles à quantifier. Ces incertitudes concernant les bénéfices d’atténuation devraient toutefois être moindres pour les activités de boisement et de reboisement, mais plus importantes pour les activités de récolte et de récupération des résidus.

Cela dit, les connaissances empiriques sur le cycle du carbone dans les écosystèmes forestiers du Québec sont en développement constant. Des ajouts relativement simples aux inventaires forestiers courants permettent par exemple de quantifier les stocks de bois mort et de suivre leur évolution dans le temps en fonction des pratiques d’aménagement [18]; les outils de télédétection par satellite et par lidar peuvent aussi jouer un rôle important pour réduire les coûts d’inventaire et de suivi. Ces nouvelles données peuvent ensuite servir à valider les projections de CBM-CFS3 et ajuster au besoin ses paramètres [17], ou alimenter des calculs du potentiel d’atténuation adaptés pour des territoires spécifiques [16]. De plus, des méthodes avancées d’évaluation des stocks de carbone dans les sols [28] offrent maintenant l’opportunité de développer une compréhension beaucoup plus fine de la dynamique des sols dans un contexte d’aménagement et de changements climatiques.

Perturbations naturelles

Pour des raisons de simplicité, la simulation des écosystèmes forestiers réalisée dans CBM-CFS3 pour ce mandat n’inclut que l’effet des activités anthropiques et exclut les régimes de perturbations naturelles (feux et insectes). Or, les perturbations naturelles ont des impacts certains sur les paysages forestiers du Québec, notamment sur la

structure d'âge des peuplements et leur productivité, avec des conséquences sur les stocks de carbone et flux de GES attribuables aux forêts.

Un exercice de simulation des perturbations naturelles historiques dans les forêts québécoises (excluant toute perturbation anthropique; données issues de l'Inventaire forestier national 2018) pour la période 1990-2016 révèle que le flux net d'émissions dans une forêt uniquement façonnée par les feux et la tordeuse des bourgeons de l'épinette serait en moyenne de -56 Mt éq. CO₂ (Figure 22). Les années de grands feux causent une hausse importante des émissions. Par contre, les effets de la défoliation due à la plus récente épidémie de tordeuse des bourgeons de l'épinette ne semblent pas se manifester immédiatement et de manière aussi aigüe, mais vont vraisemblablement influencer les flux carbone des forêts de manière plus progressive au cours des années suivant l'épidémie [29].

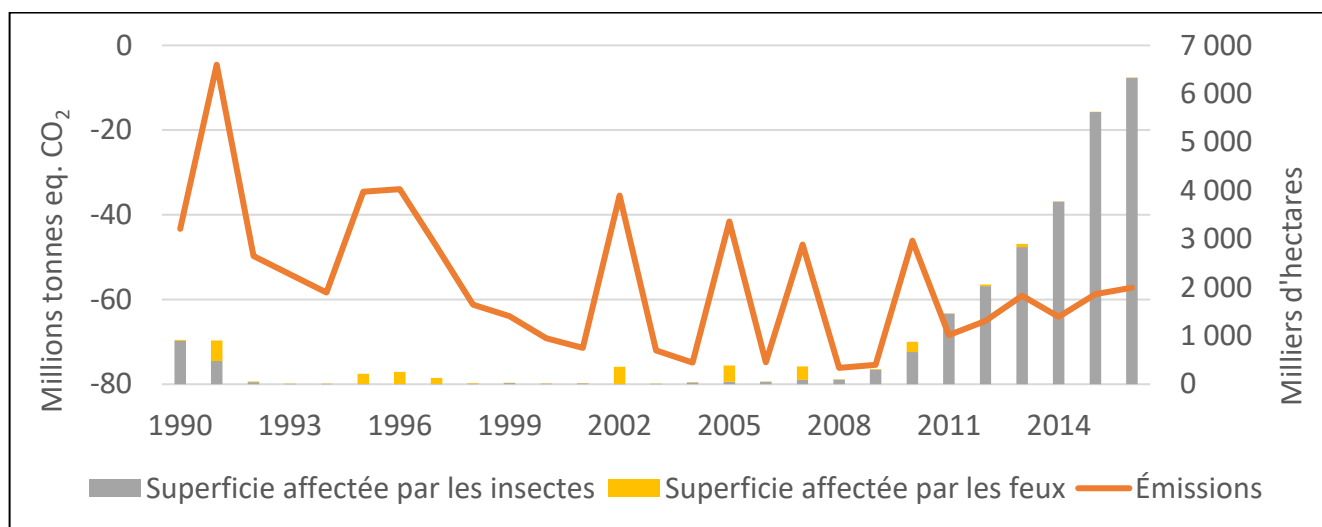


Figure 22. Flux de GES provenant des forêts influencées par les perturbations naturelles seulement

Les conséquences des perturbations naturelles sur les flux de GES devraient se manifester à la fois dans le cours normal des affaires et dans les scénarios d'atténuation; l'effet marginal des perturbations naturelles sur les mesures d'atténuation devrait donc être limité. Cela suppose toutefois que les nouvelles activités d'aménagement prévues (boisement, reboisement, récolte, etc.) n'augmentent pas les risques de feux et d'épidémies d'insectes, et que le carbone stocké sur les sites aménagés par ces activités n'est pas plus à risque d'inversion que les autres sites. Or, il existe encore de grandes incertitudes quant aux effets possibles de l'aménagement forestier sur la vulnérabilité des paysages forestiers aux perturbations naturelles, particulièrement dans un contexte de climat changeant où la température et l'aridité devraient augmenter significativement.

Une action possible face aux perturbations naturelles est, par exemple, la récupération des bois perturbés; cette action n'a cependant pas été explicitement simulée dans le cadre du présent mandat. Par exemple, au Québec, historiquement, peu de superficies brûlées sont soumises à un plan de récupération : entre 2008 et 2013, seuls 15 450 hectares sur 274 490 ha brûlés ont fait l'objet de récupération des bois suite à des feux de forêt, soit moins de 6 % [30]. Les raisons de ce faible taux de récupération sont multiples, mais comprennent le manque d'accès aux peuplements perturbés et la courte période pendant laquelle les bois peuvent être récupérés de manière rentable pour le sciage et la pâte avant une dégradation trop importante de la qualité de la fibre [31]. Le développement de marchés pour la bioénergie pourrait cependant offrir des voies de valorisation aux arbres dégradés [32] et faciliter la remise en production des sites perturbés [30], avec des bénéfices possibles en termes d'atténuation des flux de GES [33].

Effets des changements climatiques sur la composition des forêts

Par ailleurs, l'augmentation projetée de la température et de l'aridité devrait avoir des conséquences sur la croissance des espèces et leur capacité à se reproduire. Des travaux récents suggèrent par exemple que les changements climatiques pourraient causer une baisse généralisée de la productivité de la forêt boréale québécoise, ainsi qu'une diminution des espèces résineuses et leur remplacement par des espèces feuillues intolérantes dans le nord et par des espèces feuillues méridionales dans le sud [34,35]. Les conséquences de ces effets sur le potentiel d'atténuation des activités d'aménagement devront donc faire l'objet d'une attention particulière. L'utilisation d'espèces feuillues pour le boisement et le reboisement pourraient être considérées pour faciliter l'adaptation des paysages forestiers aux changements climatiques, en particulier dans un contexte d'augmentation des perturbations naturelles [36]. Les changements projetés dans la composition en espèces auront des répercussions sur le réseau industriel des produits du bois; une importante augmentation des capacités de transformation du bois feuillu en produits du bois de longue durée devrait ainsi être réalisée.

La coupe partielle comme pratique d'aménagement

Des études récentes indiquent que des pratiques d'aménagement comme la coupe partielle, en remplacement de la coupe totale, pourraient permettre d'augmenter la résilience des peuplements forestiers et des espèces résineuses aux changements climatiques [34] tout en favorisant la protection de la biodiversité et la conservation de stocks de bois mort [37,38]. La coupe partielle ne fut pas considérée dans le présent mandat. La capacité des coupes partielles à générer des bénéfices d'atténuation des GES est très dépendante de leurs effets sur la croissance des tiges résiduelles et sur le succès d'établissement et de croissance de la régénération [16,39]. Les coupes partielles en tant que mesure d'atténuation et d'adaptation aux changements climatiques devraient donc être étudiées plus en détail.

Bioénergie avec captation et stockage du CO₂

La captation et le stockage du CO₂ peuvent être effectués de manière conjointe à la production de bioénergie (technologie connue sous son acronyme anglais BECCS pour *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*). Une synthèse de la littérature [40] montre que le potentiel de cette technologie à l'échelle mondiale pourrait atteindre 4,5 Gt éq. CO₂ en 2050, pour des coûts entre 100-200 USD\$/t éq. CO₂. La séquestration géologique et le boisement, ou plus largement l'intensification de l'aménagement forestier, sont les deux seules options de séquestration qui sont technologiquement matures et actuellement prêtes à l'implantation.

RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS

Un portefeuille ambitieux d'actions, déployé progressivement à partir de 2020, incluant une transition industrielle accélérée du secteur forestier vers un haut rendement en produits de longue durée, et une substitution ciblée sur les marchés des matériaux et énergies à fortes émissions de GES, pourrait permettre des atténuations annuelles de -0,5 à -6,7 Mt éq. CO₂ /année d'ici à 2030 à l'échelle de la planète.⁷

Cela dit, la présente étude est basée sur des actions déterminées faisant partie de scénarios globaux. Elle n'a pas exploré de scénarios optimaux à l'échelle des unités d'aménagement forestier, ou sur la base d'une allocation optimale des bois en fonction de la qualité des tiges pour maximiser le rendement en produits de longue durée. Des actions autres que celles incluses dans les scénarios considérés (p. ex. coupes partielles, conservation) auraient aussi été possibles, et offriraient des atténuations différentes de celles des scénarios étudiés.

Par ailleurs, comme tout exercice de modélisation, les estimations réalisées dans le cadre de ce mandat sont sujettes à des limites et des incertitudes, tel que discuté dans la section précédente (Limites et autres considérations); elles doivent être considérées avec attention dans l'appréciation des résultats et la prise de décision.

Enfin, il est important de rappeler que toute action en forêt doit s'inscrire dans le respect des principes d'aménagement forestier durable et des objectifs de l'aménagement écosystémique, au cœur du régime forestier au Québec. Cela inclut la préservation de la biodiversité, par exemple la protection de vieilles forêts et autres sites à haute valeur de biodiversité sur les territoires.

Développement de la bioénergie

- La récupération des résidus de coupe pour la production de bioénergie (dans la mesure où elle est effectuée de manière durable en respect de la productivité des sols et la biodiversité) peut permettre d'atténuer les émissions de GES à faible coût et présente même la possibilité de générer un revenu de l'ordre de 4,31\$/t éq. CO₂. Prise seule, cette action présente toutefois le plus faible potentiel d'atténuation. Les programmes d'appui au développement de la bioénergie devront continuer de viser une utilisation ciblée de la bioénergie en remplacement des énergies fossiles dont l'empreinte GES est la plus grande (par exemple : mazout lourd, coke de pétrole; voir Encadré 2).
- Les bénéfices d'atténuation de la bioénergie issus des résidus de coupe se réalisent rapidement suite au déploiement de cette action, et croissent de manière proportionnelle à la quantité de résidus récupérés, à la condition que des substitutions ciblées soient réalisées sur les marchés.
- Le développement de la bioénergie (p. ex. pour le chauffage ou les biocarburants) procure des bénéfices économiques plus élevés lorsqu'il fait partie intégrante d'une stratégie incluant l'intensification de l'aménagement et la production de produits de longue durée. L'intégration des opérations de récolte des résidus de coupe avec la récolte des bois marchand pourrait contribuer à augmenter les bénéfices économiques ainsi que la rentabilité financière des stratégies comportant une composante bioénergétique.

Intensification de l'aménagement

- Les actions d'intensification de l'aménagement permettent de procurer des bénéfices d'atténuation élevés et des revenus économiques importants. Leur coût d'atténuation est faible (10,46\$/t éq. CO₂), mais nécessite des investissements au cours des prochaines décennies (9,6 G\$ pour la période 2020-2089).

⁷ Les atténuations annuelles citées sont obtenues en divisant les atténuations cumulatives à l'échéance 2030 (présentées au tableau 4) par le nombre d'années de la période soit 10.

Boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers

- Parmi les actions d'intensification, le déploiement rapide (dès 2021) d'un programme de boisement permet de procurer des bénéfices qui croissent à partir de 2030. Les bénéfices cumulatifs de ce programme sont de l'ordre de -26,8 Mt éq. CO₂ en 2050 pour le boisement de 500 000 ha de dénudés secs, brûlis mal régénérés et friches agricoles qui sont ajoutées aux superficies des forêts aménagées.

Récolte de bois marchand, reboisement après coupe et production de bois de sciage

- Une augmentation de la récolte et une amélioration du rendement des scieries permet la mise en marché de produits du bois de longue durée. Couplées au boisement/reboisement de sites improductifs/non-forestiers ainsi qu'à des efforts supplémentaires de reboisement après coupe totale (17 000 ha/année) assurant la régénération et la croissance rapide des aires de coupe, ces actions fournissent des bénéfices d'atténuation moyens sur la période 2020-2089 variant de -1,8 à -5,2 Mt éq. CO₂/année. Les valeurs les plus élevées sont atteintes lorsque ces actions sont associées à une transition industrielle accélérée et à une substitution ciblée sur les marchés.

Mise en valeur des bois sans preneurs

- La récolte des bois sans preneurs (feuillus de trituration, tiges de petites dimensions ou de faible qualité), faisant partie de la possibilité forestière annuelle de coupe et représentant des volumes de 8 à 10 Mm³/année, augmente la quantité de produits du bois de longue durée et de bioénergie sur les marchés. Lorsque ajouté aux actions d'intensification de l'aménagement et de développement de la bioénergie, les bénéfices d'atténuation moyens additionnels que cette récolte procure pour la période 2020-2089 varient de -1,1 à -3,8 Mt éq. CO₂/année (les valeurs les plus élevées étant associées à une transition industrielle accélérée et à une substitution ciblée sur les marchés).
- La récolte des bois sans preneurs, dans la mesure où elle respecte les objectifs d'aménagement écosystémique, produit un effet synergétique en permettant la production de bioénergie, la mobilisation de volumes de bois de qualité pour les produits du bois de longue durée, ainsi que la remise en production de peuplements qui seraient autrement peu productifs et leur remplacement par une régénération à la croissance vigoureuse.
- La récolte des bois sans preneurs, déployée progressivement à partir de 2020, nécessite des investissements supplémentaires importants en coûts d'aménagement forestier de près de 28 G\$, ceux-ci atteignant au total 40,2 G\$ sur la période 2020-2089 quand on y inclut les autres actions d'intensification et de développement de la bioénergie.
- Le potentiel d'atténuation de la récolte des bois sans preneurs ne se réalise pleinement qu'après 2050, en raison de l'effet de la récolte forestière sur la dynamique du carbone en forêt (voir Encadré 1). Mais au-delà de cette date, les bénéfices d'atténuation de cette mesure croissent régulièrement.

Substitution sur les marchés

- L'exemplarité gouvernementale en matière d'utilisation du bois en construction et le développement et l'adaptation de cadres normatifs et réglementaires soutenant l'utilisation des produits du bois dans des utilisations non-traditionnelles de longue durée doivent être favorisés par l'établissement de cibles et politiques incitatives.
- La pénétration de la bioénergie sur les marchés locaux d'énergie renouvelable pour le chauffage, les procédés industriels et le transport est aussi souhaitable.
- Le développement des biomatériaux (bioplastiques, biotextiles, chimie du bois), dont les équivalents non-renouvelables dépendent en grande partie des énergies fossiles, devraient être soutenus par la R&D et des

programmes de soutien à l'innovation, car ils pourraient potentiellement fournir un effet de substitution relativement élevé.

- Un effet élevé de substitution sur les marchés peut être favorisé par le développement d'un mécanisme gouvernemental d'évaluation de projets basé sur la comptabilisation des émissions de GES.
- Les mesures soutenant l'utilisation domestique des produits du bois de longue durée pour la construction, tout comme le développement de marchés domestiques de la bioénergie, notamment en remplacement des énergies fossiles utilisées pour le chauffage, les procédés industriels des entreprises québécoises et le transport, pourront avoir un impact tangible sur l'inventaire québécois de GES. Il sera nécessaire, pour le décideur public, d'évaluer le potentiel de substitution des produits du bois dans le contexte plus large de l'offre et la demande en matériaux et en énergie et des autres secteurs industriels qui y sont associés pour déterminer la hauteur de cet impact tangible.

Adaptation aux changements climatiques

- Les changements climatiques auront vraisemblablement un impact important sur les paysages forestiers québécois. Un des impacts possibles est l'augmentation significative des espèces feuillues au détriment des espèces résineuses en forêt boréale. L'utilisation d'espèces feuillues pour le boisement et le reboisement pourraient être considérées pour faciliter l'adaptation des paysages forestiers aux changements climatiques. Des mesures d'adaptation de la capacité industrielle devraient être mises en place afin d'augmenter les capacités de transformation du bois feuillu en produits du bois de longue durée.
- L'effet des pratiques d'aménagement forestier sur la vulnérabilité des paysages forestiers aux perturbations naturelles mérite aussi une attention particulière, pour identifier les pratiques contribuant à la résilience des forêts.
- L'implantation de mesures financières soutenant la récupération et la valorisation des bois dégradés par les perturbations naturelles pourrait favoriser l'adaptation du secteur forestier aux changements climatiques.
- L'inventaire et le suivi des stocks de carbone en forêt, permettant de valider les hypothèses sur le potentiel d'atténuation, devraient être réalisés grâce à des ajouts aux inventaires forestiers conventionnels et à l'utilisation des technologies d'imagerie satellitaire et de lidar.
- La mobilisation concertée de la recherche universitaire, collégiale et industrielle est nécessaire pour accélérer l'identification de pratiques d'aménagement et de procédés de transformation du bois permettant d'optimiser l'atténuation des changements climatiques dans un contexte d'adaptation et d'augmentation de la résilience des forêts.

PRIORITÉS D'ACTIONS

1. Augmentation du rendement et de l'utilisation en produits de longue durée

- Mettre en place les politiques, cadres réglementaires, code du bâtiment et normes de produit qui encouragent et requièrent (si possible) l'utilisation des produits du bois en construction et dans des applications de longue durée.
- Augmenter le financement des programmes de R&D visant à :
 - Améliorer le rendement en sciages et autres produits de longue durée;
 - Générer des coproduits du sciage permettant la fabrication économiquement rentable d'une gamme élargie de matériaux composites destinés à la construction (p. ex. panneaux et produits composites de structure, isolant à base de fibre de bois) et autres applications de longue durée;
 - Développer des matériaux composites à base de bois pouvant être intégrés à des scieries et substituant la production de copeaux destinés au papier.
- Stimuler le développement technologique et l'innovation par l'entremise d'investissements industriels visant l'implantation de technologies qui permettent d'augmenter la proportion de produits de longue durée.
- Identifier les produits du bois à usage matériel et les marchés qui peuvent fournir l'effet de substitution le plus élevé. Parmi les produits de longue durée à prioriser, viser les systèmes de construction (charpente en bois) et d'enveloppe de bâtiment (parement de bois et isolant à base de fibre de bois).

2. Développement de chaînes d'approvisionnement en biomasse forestière et de production de bioénergie

- Identifier les applications énergétiques fournissant l'effet de substitution le plus élevé pour la bioénergie.
- Identifier les barrières au déploiement de chaînes d'approvisionnement en biomasse forestière et de production de bioénergie. Ces barrières peuvent être de nature technique, juridique et sociale, et nécessiter des pistes d'évolution technologique et réglementaire.
- Identifier les occasions d'harmonisation des pratiques d'approvisionnement en biomasse avec les autres pratiques sylvicoles de récolte, de remise en production des sites, et d'éducation de peuplement, en vue de réduire les coûts d'approvisionnement et d'augmenter la rentabilité globale des activités forestières.
- Soutenir l'implantation de centres régionaux de transformation et de conditionnement de la biomasse, qui peuvent améliorer l'efficacité et la rentabilité des chaînes d'approvisionnement et des systèmes de production en bioénergie.

3. Récolte et mise en valeur des bois sans preneurs

- Identifier les volumes de bois sans preneurs faisant partie de la possibilité annuelle de coupe et dont la récolte peut s'harmoniser aux objectifs d'aménagement écosystémique. Analyser l'impact climatique et les contraintes écologiques, économiques et sociales associés à l'utilisation de ces volumes pour chaque unité d'aménagement.
- En fonction des contraintes identifiées, évaluer les volumes de bois sans preneurs qui peuvent être mobilisés selon différents horizons de temps, ainsi que les mesures nécessaires à leur mobilisation. Cela pourrait prendre la forme de :
 - Financement accru pour la construction de chemins pour faciliter l'accès à des peuplements éloignés;
 - Crédits sylvicoles à la récolte du bois de trituration si leur présence sur les sites nuit à la remise en production après coupe;
 - Aide au démarrage d'entreprises pouvant valoriser les bois de trituration.

4. Boisement/reboisement de sites improductifs et non-forestiers

- Identifier les superficies de sites improductifs et non-forestiers pouvant faire l'objet de boisement/reboisement.
- Évaluer les enjeux climatiques associés aux changements d'albédo et les risques potentiels d'inversion des stocks de carbone associés aux superficies identifiées.
- Évaluer les coûts associés au boisement/reboisement des superficies considérées comme adéquates suite à l'analyse des enjeux.
- Mettre en place un programme de boisement/reboisement, en s'assurant notamment de la disponibilité des plants adéquats en termes d'espèces et de provenances adaptés aux superficies et aux impacts des changements climatiques, tout en permettant un taux de croissance élevé et un rendement élevé à maturité en produits du bois de longue durée.
- Considérant l'atténuation potentielle associée au boisement/reboisement, et son faible coût par tonne de CO₂ atténuée, envisager l'inclusion prochaine de ce type d'activité en forêt publique dans le volet actuel de crédits compensatoires du Système de plafonnement et d'échange de droits d'émissions (SPEDE) du Québec.

RÉFÉRENCES

1. 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.
2. 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.
3. Fei, T.; Shuang-Qing, X. Definition of business as usual and its impacts on assessment of mitigation efforts. *Advances in Climate Change Research* **2012**, *3*, 212-219.
4. Durocher, C.; Thiffault, E.; Achim, A.; Auty, D.; Barrette, J. Untapped volume of surplus forest growth as feedstock for bioenergy. *Biomass and Bioenergy* **2019**, *120*, 376-386, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.024>.
5. Cantegril, P.; Paradis, G.; LeBel, L.; Raulier, F. Bioenergy production to improve value-creation potential of strategic forest management plans in mixed-wood forests of Eastern Canada. *Applied Energy* **2019**, *247*, 171-181, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.022>.
6. Stinson, G.; Kurz, W.; Smyth, C.; Neilson, E.; Dymond, C.; Metsaranta, J.; Boisvenue, C.; Rampley, G.; Li, Q.; White, T. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology* **2011**, *17*, 2227-2244.
7. Kull, S.; Rampley, G.; Morken, S.; Metsaranta, J.; Neilson, E.; Kurz, W. *Operational-scale carbon budget model of the Canadian forest sector (CBM-CFS3) version 1.2: user's guide*. 2014; 2014.
8. Kurz, W.A.; Dymond, C.C.; White, T.M.; Stinson, G.; Shaw, C.H.; Rampley, G.J.; Smyth, C.; Simpson, B.N.; Neilson, E.T.; Trofymow, J.A., et al. CBM-CFS3: A model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling* **2009**, *220*, 480-504, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.018>.
9. Environnement et changement climatique Canada. *Rapport d'inventaire national : émissions et absorptions des gaz à effet de serre au Canada*; Gouvernement du Canada: Ottawa, 2018; pp. 77.
10. IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*; Institute for Global Environmental Strategies: Kanagawa, Japan, 2006.
11. IPCC. *2013 Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol*; IPCC: Switzerland, 2014; pp. 267.
12. Sathre, R.; O'Connor, J. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental science & policy* **2010**, *13*, 104-114.
13. Smyth, C.; Rampley, G.; Lemprière, T.C.; Schwab, O.; Kurz, W.A. Estimating product and energy substitution benefits in national-scale mitigation analyses for Canada. *GCB Bioenergy* **2017**, *9*, 1071-1084, doi:10.1111/gcbb.12389.
14. Leskinen, L.; Cardellini, G.; González-García, S.; Hurmekoski, E.; Sathre, R.; Seppälä, J.; Smyth, C.; Stern, T.; Verkerk, P.J. *Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7*; European Forest Institute: 2018; pp. 27.
15. Lemprière, T.C.; Krcmar, E.; Rampley, G.J.; Beatch, A.; Smyth, C.E.; Hafer, M.; Kurz, W.A. Cost of climate change mitigation in Canada's forest sector. *Canadian Journal of Forest Research* **2017**, *47*, 604-614, doi:10.1139/cjfr-2016-0348.
16. Paradis, L.; Thiffault, E.; Achim, A. 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* **2019**, 10.1093/forestry/cpz004, cpz004, doi:10.1093/forestry/cpz004.

17. Sage, L.K.; Smith, C.T.; Kurz, W.; Thiffault, E.; Paré, D.; Bernier, P. Empirical and predicted boreal forest carbon pools following stem-only harvesting in Quebec, Canada. *Soil Science Society of America Journal* **2019**, 10.2136/sssaj2018.07.0283, doi:10.2136/sssaj2018.07.0283.
18. Senez-Gagnon, F.; Thiffault, E.; Paré, D.; Achim, A.; Bergeron, Y. Dynamics of detrital carbon pools following harvesting of a humid eastern Canadian balsam fir boreal forest. *Forest Ecology and Management* **2018**, 430, 33–42.
19. Repo, A.; Tuovinen, J.-P.; Liski, J. Can we produce carbon and climate neutral forest bioenergy? *GCB Bioenergy* **2015**, 7, 253-262, doi:10.1111/gcbb.12134.
20. Levasseur, A.; Lesage, P.; Margni, M.; Deschenes, L.; Samson, R. Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental science & technology* **2010**, 44, 3169-3174.
21. Levasseur, A.; Cavalett, O.; Fuglestvedt, J.S.; Gasser, T.; Johansson, D.J.; Jørgensen, S.V.; Rauegi, M.; Reisinger, A.; Schivley, G.; Strømman, A. Enhancing life cycle impact assessment from climate science: Review of recent findings and recommendations for application to LCA. *Ecological Indicators* **2016**, 71, 163-174.
22. Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P.; Russell, G.; Lea David, W.; Siddall, M. Climate change and trace gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2007**, 365, 1925-1954, doi:10.1098/rsta.2007.2052.
23. Marland, G.; Fruit, K.; Sedjo, R. Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science & Policy* **2001**, 4, 259-268, doi:[https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(01\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00038-7).
24. Smyth, C.; Stinson, G.; Neilson, E.; Lemprière, T.; Hafer, M.; Rampley, G.; Kurz, W. Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences* **2014**, 11, 3515-3529.
25. Lundmark, T.; Bergh, J.; Hofer, P.; Lundström, A.; Nordin, A.; Poudel, B.C.; Sathre, R.; Taverna, R.; Werner, F. Potential roles of Swedish forestry in the context of climate change mitigation. *Forests* **2014**, 5, 557-578.
26. Perez-Garcia, J.; Lippke, B.; Cornick, J.; Manriquez, C. An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. *Wood and Fiber Science* **2005**, 37, 140-148.
27. Bird, D.N. *Estimating the displacement of energy and materials by woody biomass in Austria*; 2013; pp. 21.
28. Andrieux, B.; Beguin, J.; Bergeron, Y.; Grondin, P.; Paré, D. Drivers of postfire soil organic carbon accumulation in the boreal forest. *Global Change Biology* **2018**, 24, 4797-4815, doi:10.1111/gcb.14365.
29. Dymond, C.C.; Neilson, E.T.; Stinson, G.; Porter, K.; MacLean, D.A.; Gray, D.R.; Campagna, M.; Kurz, W.A. Future spruce budworm outbreak may create a carbon source in eastern canadian forests. *Ecosystems* **2010**, 13, 917-931, doi:10.1007/s10021-010-9364-z.
30. Bureau du forestier en chef. *État de la forêt publique du Québec et de son aménagement durable – Bilan 2008-2013*. ; Gouvernement du Québec: Roberval, Québec, 2015; pp. 382.
31. Barrette, J.; Thiffault, E.; Saint-Pierre, F.; Wetzal, S.; Duchesne, I.; Krigstin, S. Dynamics of dead tree degradation and shelf-life following natural disturbances: can salvaged trees from boreal forests ‘fuel’ the forestry and bioenergy sectors? *Forestry* **2015**, 88, 275-290.
32. Barrette, J.; Thiffault, E.; Paré, D. Salvage harvesting of fire-killed stands in northern Quebec: analysis of bioenergy and ecological potentials and constraints. *Journal of Science & Technology for Forest Products and Processes* **2013**, 3, 16-25.
33. Röder, M.; Thiffault, E.; Martínez-Alonso, C.; Senez-Gagnon, F.; Paradis, L.; Thornley, P. Understanding the timing and variation of greenhouse gas emissions of forest bioenergy systems. *Biomass and Bioenergy* **2019**, 121, 99-114, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.019>.
34. Boulanger, Y.; Taylor, A.R.; Price, D.T.; Cyr, D.; McGarrigle, E.; Rammer, W.; Sainte-Marie, G.; Beaudoin, A.; Guindon, L.; Mansuy, N. Climate change impacts on forest landscapes along the Canadian southern boreal forest transition zone. *Landscape Ecology* **2017**, 32, 1415-1431, doi:10.1007/s10980-016-0421-7.

35. D'Orangeville, L.; Houle, D.; Duchesne, L.; Phillips, R.P.; Bergeron, Y.; Kneeshaw, D. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications* **2018**, *9*, 3213, doi:10.1038/s41467-018-05705-4.
36. Terrier, A.; Girardin, M.P.; Périé, C.; Legendre, P.; Bergeron, Y. Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications* **2013**, *23*, 21-35.
37. Elliott, K.J.; Miniati, C.F.; Medenblik, A.S. The long-term case for partial-cutting over clear-cutting in the southern Appalachians USA. *New Forests* **2019**, 10.1007/s11056-019-09731-y, doi:10.1007/s11056-019-09731-y.
38. Fenton, N.J.; Imbeau, L.; Work, T.; Jacobs, J.; Bescond, H.; Drapeau, P.; Bergeron, Y. Lessons learned from 12 years of ecological research on partial cuts in black spruce forests of northwestern Québec. *The Forestry Chronicle* **2013**, *89*, 350-359, doi:10.5558/tfc2013-065.
39. Assmuth, A.; Tahvonen, O. Optimal carbon storage in even- and uneven-aged forestry. *Forest Policy and Economics* **2018**, *87*, 93-100, doi:<https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.09.004>.
40. Minx, J.C.; Lamb, W.F.; Callaghan, M.W.; Fuss, S.; Hilaire, J.; Creutzig, F.; Amann, T.; Beringer, T.; de Oliveira Garcia, W.; Hartmann, J. Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters* **2018**, *13*, 063001.

ANNEXE : COMITÉ SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Les travaux du *Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques* ont bénéficié de la contribution scientifique et technique des individus et organisations mentionnés ci-dessous. Il est à noter que le contenu de ce rapport, incluant les recommandations, reflète uniquement l'opinion des auteurs réunis dans *le Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques*; il n'engage en rien les individus, ministères et organismes mentionnés ci-dessous.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec
 - Pierre Letarte
 - Frank Muessenberger
 - Julie Poulin
 - Jean-Pierre Saucier
- Ministère de l'Environnement et des Changements climatiques du Québec
 - Carl Dufour
 - Claude Fortin
 - Catherine Gauthier
 - Patrick McNeil
 - Laurence Paradis
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec
 - Philippe Thellen
- Transition énergétique Québec
 - Guy Desbiens
 - Ibrahima Gassama
- Bureau de Mise en Marché des Bois
 - Yves Gauthier
- Bureau du Forestier en Chef
 - Jean-François Carle
 - Jean Girard
 - Simon Guay
 - Philippe Marcotte
- Ressources naturelles Canada – Service canadien des forêts
 - Werner Kurz
 - Carolyn Smyth
 - David Paré
 - Tony Lemprière
- Environnement et Changement Climatique Canada
 - Alain Gingras

Contributions additionnelles

- Ressources naturelles Canada – Service canadien des forêts
 - Max Fellows
 - Michael Magnan
 - Mark Hafer
 - Zach Xu
 - Mihai Voicu
- Université du Québec à Chicoutimi
 - Boris Dufour
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec
 - Carl Bergeron
 - François Baril
 - Marc Plante
 - Marc Leblanc
- Ministère de l'Environnement et des Changements climatiques du Québec
 - Stéphane Nolet
- Bureau de Mise en Marché des Bois
 - Mélissa Lainesse
 - Stéphane St-Pierre
 - Sébastien Crosnier-Pichette
 - François Labbé
- Cecobois
 - Caroline Frenette
 - Yannick Lessard

