

Évaluation du potentiel d'atténuation du secteur forestier québécois dans la lutte contre les changements climatiques.

Présenté au Comité consultatif sur les changements climatiques dans le cadre d'une bourse Action Climatique 2022-2023

Lucas Moreau

4 septembre 2023

Résumé

Le rôle des forêts dans la réalisation des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (GES) prévues à l'échelle planétaire pourrait être substantiel. Comprendre le rôle du secteur forestier va devenir d'autant plus important que la demande en bois risque d'être toujours plus soutenue dans le futur. Il existe cependant un grand degré d'incertitude quant à la stratégie sectorielle à mettre en œuvre pour maximiser les réductions de GES : faut-il chercher à maximiser la production de bois (c'est-à-dire à augmenter les niveaux de récolte) ou gérer les écosystèmes sous un régime de protection (c'est-à-dire diminuer les niveaux de récolte) ? L'incertitude augmente en raison des impacts potentiels des changements climatiques sur la capacité des écosystèmes à stocker du carbone et à répondre aux besoins en bois des marchés. Les actions d'atténuation du secteur forestier ne se limitent cependant pas aux forêts. Il est aussi nécessaire de considérer les émissions de GES issues de la décomposition des produits du bois et l'utilisation de ces produits en remplacement de matériaux et sources d'énergie à plus forte empreinte carbone. Une sélection non exhaustive ne peut conduire qu'à des conclusions partielles qui pourraient s'avérer contreproductives dans la lutte contre les changements climatiques.

L'objectif de ce travail est donc d'évaluer le potentiel d'atténuation du secteur forestier québécois, en identifiant les obstacles à éviter et les opportunités à saisir, afin de développer une stratégie sectorielle efficace dans la lutte contre les changements climatiques.

Les résultats suggèrent que, de l'échelle du peuplement à l'échelle de la province, les stratégies d'aménagement basées sur l'augmentation du volume de bois récolté n'apportent généralement pas de bénéfices climatiques, contrairement à celles qui visent à réduire le volume récolté par rapport à la stratégie de référence. La perte de carbone dans les écosystèmes forestiers, due à une augmentation des superficies récoltées, couplée à une augmentation des émissions de GES des produits n'est pas compensée par des effets de substitution trop faibles et incertains. Ces conclusions s'appliquent autant à moyen (2050) qu'à long terme (2100), et avec ou sans prise en compte de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers. Cette conclusion est d'ailleurs exacerbée lorsque les analyses ne sont plus faites en dioxyde de carbone équivalent, mais selon le forçage radiatif des émissions, donc avec une meilleure prise en compte de la temporalité des émissions de GES et de leur pouvoir réchauffant. Cependant,

ces travaux démontrent aussi que les deux grands types de stratégies d'aménagement forestier peuvent coexister pour maximiser le potentiel d'atténuation du secteur forestier provincial. Tout d'abord, car certains peuplements forestiers pourraient bénéficier des perturbations pour redynamiser leur productivité. La nécessité de considérer les caractéristiques initiales des peuplements et l'impact d'une perturbation sur leurs dynamiques est donc primordiale. D'autre part, l'augmentation du volume de bois récolté pourrait apporter un bénéfice climatique si une meilleure substitution moyenne pouvait être atteinte et/ou une meilleure gestion des émissions, notamment de méthane, engendrées par la fin de vie des produits du bois était mise en place. Ces effets permettraient donc une coexistence des deux grands types d'aménagement par rapport à la stratégie de référence. Une stratégie de réduction de la récolte n'est pas exempte de toute incertitude. C'est un risque de saturation de la séquestration des écosystèmes, mais aussi un risque pour des stocks de carbone sensibles à l'augmentation des perturbations naturelles. De plus, les risques de fuite sont importants. Le bois non récolté sera selon toute vraisemblance compensé par une récolte accrue dans d'autres juridictions pour satisfaire la demande en ressource biosourcée.

Il apparaît donc que ni une stratégie basée seulement sur la réduction et encore moins sur l'augmentation du volume de bois récolté ne soit une solution idéale. Il est nécessaire de déployer les actions d'atténuation avec un potentiel de réalisation important et qui ne seront dans aucun cas contreproductives dans le futur ; comme le boisement des territoires anthropisés, une gestion améliorée des émissions de fin de vie ou encore un soutien à l'innovation des produits du bois afin d'en augmenter la proportion qui possède une plus longue durée de vie. Dans le même temps, il faut développer les fondements opérationnels d'une optimisation des niveaux de récolte selon les caractéristiques des écosystèmes forestiers. Ce sont des étapes nécessaires pour permettre une prise de décision éclairée et le développement d'une stratégie sectorielle efficace.

Table des matières

Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	v
Introduction générale	1
La lutte contre les changements climatiques	1
La foresterie au Québec	2
Le rôle théorique du secteur forestier	4
Le périmètre de comptabilisation des bilans carbone	7
Les impacts théoriques des changements climatiques sur le secteur forestier	8
Objectif	10
Discussion générale	11
Synthèse de l'impact des actions d'atténuation	11
L'enjeu des considérations temporelles	30
Conclusion générale	32
Bibliographie	35

Liste des tableaux

1	Les clés d'amélioration du potentiel d'atténuation du secteur forestier québécois dans la lutte contre les changements climatiques.	13
2	Détermination de la valeur en tCO ₂ eq des émissions de GES issues de la dégradation d'une tonne de carbone dans les lieux d'enfouissement en fonction de la proportion de carbone dégradé et de la proportion de méthane émise.	25

Introduction générale

La lutte contre les changements climatiques

Les scientifiques observent sans discontinuité, depuis le début de la période industrielle une augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES) (Friedlingstein et al., 2022). L'illustration la plus forte est certainement la variation de la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), elle atteint aujourd'hui 417.2 ppm (+ 2.5 ppm pour l'année 2021), une concentration 50% supérieure à son niveau préindustriel (Friedlingstein et al., 2022). Or, il est démontré que cette hausse de concentration de GES dans l'atmosphère est responsable des changements climatiques (Arias et al., 2021). Afin de répondre à l'urgence climatique (Ipcc, 2018; Arias et al., 2021), il est donc primordial de mettre en place des mesures d'atténuation et d'adaptation à l'échelle planétaire (Arias et al., 2021). Pour réduire efficacement les émissions de GES et atteindre les objectifs de lutte contre les changements climatiques décrits dans les accords internationaux, des efforts doivent notamment être faits pour renforcer les puits de carbone naturels, notamment ceux engendrés par le processus de photosynthèse de la végétation (Nabuurs et al., 2022). Le rôle des forêts dans la réalisation des cibles d'atténuation pourrait être substantiel et ainsi représenter un quart des réductions d'émissions prévues à l'échelle planétaire dans le cadre de l'Accord de Paris lors de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) de 2015 (Grassi et al., 2017). Si ce travail porte toute son attention sur les actions d'atténuation propre au secteur forestier, tel que défini par IPCC (2021) comme « l'intervention humaine visant à réduire les émissions ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre », leur mise en application, ne peut se faire, sans une considération des besoins en adaptation nécessaire à la réussite des mesures d'atténuation. L'adaptation se définit comme une « démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu ainsi qu'à ses conséquences, de manière à en atténuer les effets préjudiciables et à en exploiter les effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter leur adaptation au climat attendu et à ses conséquences » (IPCC, 2021).

La foresterie au Québec

La foresterie québécoise est riche d'une longue histoire. Si la forêt québécoise s'étend sur plus de 905 810 km² (MFFP, 2021b), la forêt commerciale aménagée, c.-à-d., dans laquelle une action d'aménagement peut être exercée, représente environ 500 000 km². On retrouve environ 72 000 km² de forêt privée majoritairement dans le sud de la province et plus de 420 000 km² de forêt publique. Toute la forêt de la province n'est donc pas aménagée et c'est la limite nordique des forêts attribuables (Gouvernement du Québec, 2013) qui détermine le territoire de la forêt commerciale québécoise. Aujourd'hui, la loi sur l'aménagement durable du territoire forestier encadre l'aménagement forestier pour l'ensemble de la province (Gouvernement du Québec, 2013).

Il est bien important de faire la différence entre les territoires forestiers productifs, les territoires forestiers improductifs et les territoires non forestiers. Un territoire non forestier est caractérisé par une densité inférieure à 25 % et dont la hauteur de la végétation n'excède pas 10 mètres à 120 ans (MFFP, 2008). Les territoires forestiers productifs concernent ensuite tous les territoires occupés par des peuplements forestiers capables de produire 30 m³ ou plus de matière ligneuse à l'hectare en 120 ans ou moins (MFFP, 2008). Un peuplement forestier ne produisant pas 30 m³ en 120 ans est donc considéré comme improductif. La transition d'un territoire productif à improductif à la suite d'une perturbation ne peut avoir lieu que 40 ans après ladite perturbation (MFFP, 2008). Les travaux dans ce document ne concernent que les territoires forestiers productifs de la province du Québec. Si la détermination du potentiel d'atténuation des territoires forestiers non productifs et non forestiers n'est pas l'objet de mes travaux, ils seront néanmoins discutés dans la discussion générale afin de faire émerger une stratégie sectorielle cohérente.

Le vaste territoire forestier commercial de la province couvre un large gradient climatique qui façonne les paysages, notamment par la durée de la saison de croissance de la végétation. On retrouve ainsi des forêts décidues de la zone tempérée nordique dans le sud de la province jusqu'aux forêts boréales de conifères nordiques proches de la limite nord des forêts commerciales (Saucier et al., 1998). Le sud de la province est une zone de transition entre le biome tempéré et boréal du continent nord-américain (Saucier et al., 1998). Dans cette zone de transition, les essences vivent aux limites de leur aire de répartition, ce qui conduit la compétition interspécifique à y être très importante. Ces écosystèmes sont donc très instables, et de légères variations dans les conditions climatiques ou de faibles perturbations peuvent entraîner d'importants changements dans la structure et la composition des écosystèmes forestiers (Goldblum and Rigg, 2010). Les paysages forestiers du Québec situés dans le biome boréal sont plus stables en termes de composition et de structure, ceci malgré les perturbations naturelles importantes et sévères (infestation d'insecte, feux, etc.) qui s'y produisent (Gauthier et al., 2015b). En raison des différentes dynamiques naturelles et de la tenure que l'on retrouve dans la province, les stratégies sylvicoles de gestion forestière peuvent varier

considérablement d'une région à une autre. On retrouve ainsi des rotations longues et des coupes totales importantes de manière plus courantes dans le nord, tandis que des coupes partielles sont récurrentes dans les paysages du sud de la province.

Il existe une industrie forestière bien établie dans l'ensemble du Québec qui sert souvent d'ancrage aux communautés éloignées des grands centres urbains (MFFP, 2021b). La province possède une industrie forestière mature, à la pointe de l'innovation et hautement compétitive, qui fournit des produits du bois à la fois pour les marchés nationaux et internationaux (Bernier et al., 2018).

Le gouvernement du Québec s'est doté en 2020 d'une nouvelle Stratégie nationale de production de bois (MFFP, 2020). Cette dernière a notamment pour objectif l'augmentation des quantités de bois récolté dans les prochaines décennies afin de répondre aux besoins des marchés nationaux et internationaux. On parle d'une augmentation substantielle des volumes récoltés, d'au moins 4 Mm³ à partir de 2025 et de 23.9 Mm³ d'ici 2080 par rapport au niveau de référence actuel (MFFP, 2020). Si répondre à la demande des marchés et stimuler ainsi la croissance économique du secteur forestier est une priorité, cette Stratégie nationale de production de bois a aussi pour ambition d'être un vecteur de contribution aux objectifs d'atténuation contre les changements climatiques (MFFP, 2020). Et ce par « la combinaison d'une variété de mesures adaptées aux différentes réalités observées » (MFFP, 2020), des mesures et des choix d'aménagement qui proviendront de la recherche. Cette augmentation du volume récolté ne pourra se faire qu'en accord avec la législation en place dans la province, notamment la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (Gouvernement du Québec, 2013), et la détermination de la possibilité forestière qui en découle. La possibilité forestière correspond « au volume maximum des récoltes annuelles de bois par essence ou groupe d'essences que l'on peut prélever tout en assurant le renouvellement et l'évolution de la forêt sur la base des objectifs d'aménagement durable des forêts applicables » (Gouvernement du Québec, 2013). Or il est vrai qu'aujourd'hui cette possibilité annuelle sur terre publique n'est pas entièrement récoltée, 55% le sont chaque année en moyenne (Durocher et al., 2019). Cette proportion récoltée cache des disparités entre les essences forestières (seulement 19 à 38% des volumes de bois feuillus sont récoltés) dues principalement à des considérations économiques pour des peuplements de faible qualité ou sans débouchés sur les marchés (Durocher et al., 2019). En vue de satisfaire les objectifs établis dans la Stratégie nationale de production de bois à l'horizon 2050, il est envisageable d'accroître les volumes de bois récoltés pour atteindre les niveaux calculés, tout en gardant la possibilité au niveau actuel. Il sera cependant nécessaire d'accroître la productivité moyenne de la forêt commerciale provinciale afin de garantir les augmentations fixées pour 2080 (MFFP, 2020). Sur les territoires forestiers de tenure privée, un nouveau Plan d'action sur la mobilisation des propriétaires forestiers à la récolte de bois existe depuis 2022. Ce dernier vise à accroître les volumes de bois provenant des forêts privées afin de suivre les préconisations de la Stratégie nationale de production de bois (MFFP, 2022).

En effet, seulement 47% de la possibilité forestière des forêts privées sont aujourd'hui récoltés, des mesures d'incitations doivent donc être mises en place afin d'accroître cette proportion.

L'accroissement de la récolte préconisé dans la Stratégie nationale de production de bois aura des impacts sur les dynamiques de carbone dans les écosystèmes forestiers provinciaux et dans les stocks de produits du bois engendrés. La qualité du bois récolté pour atteindre ces objectifs de coupe et leurs devenir sur les marchés, doivent eux aussi faire l'objet d'une attention particulière. Seule la prise en compte de l'ensemble des impacts des préconisations avancées dans la Stratégie nationale de production de bois à l'échelle de la province pourra garantir un potentiel bénéfique climatique dans la lutte contre les changements climatiques (MFFP, 2020). Il est d'autant plus important d'effectuer cette analyse du secteur forestier que ce potentiel avancé dans la Stratégie nationale est, au moins en partie, contradictoire avec la littérature scientifique existante pour le Québec. Smyth et al. (2014) semble en effet indiquer que l'intensification de l'aménagement n'entraînerait pas les bénéfices carbone les plus importants pour la province.

Le rôle théorique du secteur forestier

Les actions d'atténuation du secteur forestier ne se limitent pas seulement à augmenter la séquestration de carbone dans les écosystèmes forestiers. Il est nécessaire de réduire les émissions de GES issues de la décomposition des produits à base de bois, ainsi qu'élargir l'utilisation de produits du bois pour remplacer les matériaux et sources d'énergie à forte empreinte carbone qui émettent des niveaux élevés de GES dans l'atmosphère (Nabuurs et al., 2007, 2022). C'est pourquoi il est primordial de considérer le secteur forestier comme les écosystèmes forestiers provinciaux, les produits du bois issus de leur exploitation et la substitution que ces derniers peuvent engendrer sur les marchés (Smyth et al., 2014; Nabuurs et al., 2022). Le rôle du secteur forestier va devenir d'autant plus important que la demande en ressource biosourcée risque d'être aussi toujours plus soutenue dans le futur (FAO, 2022; Hasegawa et al., 2022; Hurmekoski et al., 2023). Il existe cependant un grand degré d'incertitude quant à la stratégie sectorielle à mettre en œuvre pour maximiser les réductions de GES : faut-il chercher à maximiser la production de bois (c'est-à-dire à augmenter les niveaux de récolte) ou la réduire (c'est-à-dire diminuer les niveaux de récolte) (Berndes et al., 2018)? Cette incertitude est un véritable enjeu pour le secteur forestier, et il est d'autant plus complexe que les effets combinés de l'aménagement forestier et d'un climat changeant peuvent entraîner des variations significatives des caractéristiques dans les paysages forestiers. Ce qui pourrait, à terme, modifier la capacité des écosystèmes à stocker du carbone (Steenberg et al., 2013; Brice et al., 2019) et à répondre aux besoins en biomasse ligneuse (Brecka et al., 2020). De plus, selon l'échelle spatiale considérée, les dynamiques du carbone peuvent différer (provinciale, du paysage et du peuplement). Cette différence s'explique par l'impact de nombreux facteurs, et en particulier par la distribution des classes d'âge des différents peuplements dans un paysage ou

une région (Peichl et al., 2023). Évaluer les dynamiques du carbone au niveau du peuplement est alors un enjeu majeur afin de mieux comprendre les tendances observées à plus grande échelle (paysage et provinciale).

Avant les travaux qui vont être abordés dans ce document, une seule étude scientifique tentait de répondre à cet enjeu par une analyse sectorielle de différentes stratégies d'aménagement et d'utilisation de la biomasse ligneuse à l'échelle canadienne (Smyth et al., 2014). Au Québec, la diminution du volume de bois récolté est considérée comme la mesure la plus susceptible de générer des bénéfices climatiques, tandis que dans d'autres régions du Canada, ce n'était pas toujours le cas. Ce qui met en évidence la difficulté de généraliser une seule stratégie de mise en place d'actions d'atténuation à l'ensemble des conditions forestières nationales (Smyth et al., 2014). C'est le constat de Smyth et al. (2014) pour le Québec qui sert d'hypothèse principale à l'ensemble de mes travaux de recherche, c.-à-d., la réduction du volume de bois récolté est la stratégie sectorielle qui engendrerait le plus grand potentiel d'atténuation pour le secteur forestier québécois.

Toutefois, une stratégie liée au niveau de récolte peut s'articuler de nombreuses façons. Ainsi, si la réduction pure et simple des volumes récoltés est possible, de plus longs cycles de récolte ou une amélioration de la productivité des écosystèmes sans accroître le niveau de récolte, peuvent mener à des résultats similaires. De la même manière, l'augmentation du volume récolté peut passer par un accroissement de la productivité, ou par une récolte de peuplements de faible qualité aujourd'hui non récoltés (Durocher et al., 2019), ou par une augmentation des éclaircies commerciales, ou encore par la récupération des résidus de coupe (Smith et al., 2014; Dugan et al., 2018).

L'accroissement de la productivité peut notamment recourir à un boisement des territoires sans vocation forestière et au reboisement des territoires forestiers non productifs (enjeux non développés dans mes travaux de recherche). De telles pratiques sont reconnues pour pouvoir engendrer un bénéfice climatique important (Nabuurs et al., 2007, 2022) et pourraient être un outil de lutte efficace pour la province du Québec (Ménard et al., 2022b,a). Il devient donc nécessaire de déterminer si certaines actions d'atténuation pourraient avoir un impact carbone plus important que d'autres, même au sein d'une stratégie générale d'aménagement identique.

Si les principes généraux, qui conduisent l'aménagement des écosystèmes forestiers à être un outil de lutte contre les changements climatiques, sont bien connus; comme augmenter les stocks de carbone dans les peuplements, limiter les pertes de matière organique morte, lutter contre l'érosion des sols, etc. (Nabuurs et al., 2007), leur mise en application et leurs impacts à l'échelle provinciale reste à être déterminée. Selon le type d'opération sylvicole de coupe effectuée (partielle, totale, etc.), les écosystèmes forestiers sont affectés de manière différente. La dynamique post-récolte du carbone dans les peuplements forestiers au Québec

est relativement bien connue à la suite d'une coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) (Senez-Gagnon et al., 2018), le type de coupe le plus répandu dans les territoires forestiers boréaux. La dynamique du carbone est bien moins connue pour les multiples autres types de coupes et notamment pour les coupes partielles. La CPRS crée une période d'émissions vers l'atmosphère dans les années suivant la récolte en raison des émissions de décomposition au sein de l'écosystème qui deviennent significativement plus élevées que la séquestration induite par la reprise de croissance via la photosynthèse, et ce pendant 10 à 30 ans (Senez-Gagnon et al., 2018; Paradis et al., 2019; Kurz et al., 2013). Garantir une régénération suffisante et vigoureuse, notamment par le reboisement, est alors une des solutions permettant une reprise de la photosynthèse plus rapidement après coupe (Nabuurs et al., 2007; Kurz et al., 2013). D'autres régimes sylvicoles tels que la sylviculture à couvert continu (coupes partielles) peuvent offrir un potentiel d'atténuation plus important en limitant les émissions attribuables à la récolte (Thorpe et al., 2007; Gauthier et al., 2015a; Bose et al., 2018; Ameray et al., 2021), tout en maintenant la production de bois (Pukkala, 2014). C'est notamment pourquoi, du point de vue d'une analyse carbone, on pose l'hypothèse que la coupe partielle serait un type d'opération à favoriser au détriment de la CPRS, cela afin de maximiser le potentiel de lutte contre les changements climatiques de la récolte forestière.

La récolte a pour but la fabrication de produits en bois. Ces derniers sont importants à considérer dans une analyse sectorielle, car ils représentent un stockage de carbone important lors de leur temps de service, en effet, il est admis que 50% de la masse d'un produit en bois est constituée de carbone (Rüter et al., 2019). La gamme actuelle de produits est très diversifiée, allant des molécules aux bioplastiques et autres composites, jusqu'aux produits plus courants tels que ceux que l'on retrouve dans le secteur de la construction (Hurmekoski et al., 2018, 2022; FAO, 2022; Hasegawa et al., 2022; Hurmekoski et al., 2023). C'est notamment la proportion de produits à longue durée de vie qui est un facteur d'amélioration du potentiel d'atténuation du secteur forestier. Ces produits permettent en effet de prolonger le stockage du carbone et ainsi reporter dans le temps les émissions liées à leur décomposition (Smith et al., 2014; Chen et al., 2018a,b; Dugan et al., 2018; Parobek et al., 2019). Même si l'on pourrait facilement vouloir privilégier les produits à longue durée de vie comme le bois d'ingénierie et l'ameublement, au détriment des produits à durée de vie plus courte tels que le papier et le carton. C'est principalement la structure industrielle existante ainsi que la qualité de la fibre issue du bois qui détermine son utilisation. Cette qualité dépend entre autres de l'essence et des caractéristiques individuelles des arbres récoltés, tels que leur diamètre, leur défilement, ou encore leur âge (Lessard et al., 2014; Bureau de mise en marché des bois, 2018; Côté et al., 2021). Ainsi, toutes les récoltes ne donnent pas lieu à une fibre de bois de qualité équivalente. La qualité de la fibre est donc un point à considérer pour toute stratégie basée sur l'augmentation des volumes récoltés.

Le fait de fournir les marchés en bois ne doit pas faire oublier le potentiel d'émissions élevées provenant de la décomposition de ces produits lors de leur fin de vie. Les émissions de GES issues des lieux d'enfouissement sont d'ailleurs un outil important de lutte contre les changements climatiques (Chen et al., 2014; Environment and Climate Change Canada, 2022b). En effet, le carbone stocké dans les produits du bois est partiellement réémis dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4), en fonction du type de lieu d'enfouissement et de l'utilisation finale considérée (MELCCFP and MAPAQ, 2022). Or, le potentiel de réchauffement global (PRG) du CH_4 est 25 fois supérieur à celui du CO_2 , sa gestion est donc primordiale et peut avoir des impacts bénéfiques importants sur l'ensemble du secteur forestier (Chen et al., 2014).

L'utilisation de produits en bois, en remplacement de matériaux et sources d'énergie à forte empreinte carbone, est elle aussi essentielle pour que le secteur forestier contribue à la réduction des émissions des GES (Leskinen et al., 2018; Seppälä et al., 2019; Hurmekoski et al., 2021). Cette substitution est estimée à l'aide de facteurs de déplacement, ils quantifient la réduction d'émissions obtenue par unité de bois utilisée par rapport à un autre matériau aux fonctions équivalentes. Il est exprimé en tonnes de carbone évitées par tonne de carbone présent dans le produit en bois (Sathre and O'Connor, 2010). L'utilisation et la détermination de tels facteurs de déplacements sont sujettes à d'importantes incertitudes, et leurs limites doivent être prises en compte dans toute considération de l'effet de substitution dans l'analyse du potentiel d'atténuation d'une stratégie sectorielle (Harmon, 2019; Howard et al., 2021; Brunet-Navarro et al., 2021).

Le périmètre de comptabilisation des bilans carbone

La détermination du périmètre de comptabilisation est primordiale afin de bien comprendre d'où proviennent les émissions et les absorptions de carbone présentées dans les analyses des bilans carbone d'une étude. Un périmètre comptable clair permet aussi d'éviter toute non-comptabilisation ou double comptabilisation de flux de carbone avec des études du même champ de recherche (Rüter et al., 2019). En lien avec les recommandations du GIEC, mes travaux sont faits tous sous une approche dite « simple-decay » (Rüter et al., 2019). Contrairement à l'approche « production » dont elle partage bien des similitudes, l'approche « simple-decay » fonctionne par flux de CO_2 à l'atmosphère et non par différence de stock (Rüter et al., 2019). Ainsi, contrairement à l'approche "production", le transfert du carbone forestier du réservoir forêt vers le réservoir de produits du bois n'est pas considéré comme une perte de carbone dans le réservoir forêt, mais est plutôt comptabilisé comme des émissions provenant du réservoir des produits du bois au moment de leur fin de vie. Sont donc pris en compte les flux d'émissions et de séquestration entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère, ainsi que les émissions des produits du bois provenant du Québec, qu'ils soient consommés au niveau provincial ou exportés vers d'autres juridictions (Rüter et al., 2019). À cela est rajouté l'effet

de substitution engendré par l'ensemble des produits du bois issus de la récolte provinciale.

L'élaboration d'une stratégie sectorielle de lutte contre les changements climatiques passe par la détermination du bilan carbone de stratégies alternatives au cours normal des affaires dans un périmètre de comptabilisation donné. Si la valeur absolue du bilan carbone du secteur forestier peut être pertinente, notamment pour évaluer l'impact des changements climatiques sur le système, la détermination du potentiel d'atténuation propre à chaque alternative est primordiale. Ce potentiel d'atténuation qui est calculé par la soustraction du bilan carbone d'une stratégie alternative (séquestration et émissions des écosystèmes forestiers, des produits du bois et de l'effet de substitution engendré) par rapport à celui de la référence pour une période donnée, indique en effet la capacité théorique de lutte contre les changements climatiques de l'alternative modélisée et simulée. Ce potentiel d'atténuation permet de déterminer si l'alternative modélisée engendrerait un bénéfice climatique par rapport à la référence, et d'en mesurer l'importance le cas échéant.

La robustesse du scénario de référence devient alors fondamentale. S'il est plutôt aisé de le caractériser sur une échelle spatiale réduite, la difficulté devient autrement plus significative quand cette échelle tend à s'agrandir. C'est là aussi un grand avantage d'analyser les résultats en utilisant le concept de potentiel d'atténuation : les incertitudes qui sont présentes à la fois dans le scénario de référence et dans les scénarios alternatifs sont théoriquement annulées par soustraction. L'analyse des résultats peut donc se concentrer sur l'impact des actions d'atténuation simulées. De plus, s'il n'est pas question de se satisfaire d'imperfections de modélisation dues à un manque de connaissances ou de données, il faut néanmoins avancer le fait que déterminer les pistes de solution pour l'élaboration d'une stratégie sectorielle est un objectif large qui tend à faire émerger des tendances et des questionnements propres à de grands ensembles, ce qui est très différent de la mise en place opérationnelle de cette stratégie.

Les impacts théoriques des changements climatiques sur le secteur forestier

De nombreuses études montrent que l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers sera important, autant sur la productivité des forêts que sur leurs compositions (Montoro Girona et al., 2023; Hof et al., 2023). Les changements climatiques ont le potentiel d'augmenter la croissance de la végétation et donc la séquestration de carbone, à moins que l'ampleur du forçage climatique ne devienne excessif (D'Orangeville et al., 2018; Boulanger and Pascual Puigdevall, 2021). L'ampleur de cette variation de croissance dépend aussi largement de l'humidité du sol et des niveaux de précipitations (Girardin et al., 2016; Kurz et al., 2013), l'augmentation des niveaux de sécheresse cause déjà une mortalité accrue dans la forêt boréale canadienne (Peng et al., 2011). Toutefois, déterminer l'effet précis du changement climatique sur la croissance de la végétation reste un défi et un véritable enjeu.

Cette variabilité dépend d'une myriade de facteurs propres à chaque peuplement (structure, caractéristiques du site, événements climatiques extrêmes, etc.) et en particulier aux espèces présentes (résistance, résilience, capacité de migration, etc.) (Boulanger et al., 2017; Brecka et al., 2020; Montoro Girona et al., 2023). Les changements climatiques pourraient également à terme favoriser la respiration hétérotrophe en augmentant notamment la température et en modifiant l'humidité du sol (Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Krishna and Mohan, 2017; Peng et al., 2008), ce qui aura pour conséquence d'accroître les émissions de carbone issues des processus de dégradation de la matière organique morte.

Les changements climatiques devraient aussi avoir un impact important sur la dynamique des perturbations naturelles dans les paysages forestiers de la province. Ainsi, un régime de feu plus important (en fréquence et en intensité) pourrait avoir des conséquences sur les forêts boréales, leurs dynamiques, compositions et structures (Flannigan et al., 2016; Boulanger et al., 2017; Kuuluvainen and Gauthier, 2018). L'augmentation du régime de feu pourrait aussi accroître les incidents de régénération et ainsi favoriser l'apparition de dénudés secs et de territoires improductifs. Une augmentation des épidémies d'insectes, de pathogènes, des événements de forts chablis ou de gel sont aussi à prévoir, avec des conséquences importantes sur les dynamiques de carbone dans les écosystèmes forestiers, notamment par une réduction de la production de biomasse (Seidl et al., 2017). L'ensemble des perturbations naturelles développent des synergies qui tendent à en amplifier les impacts sur les territoires forestiers, il est donc nécessaire de mieux en comprendre les dynamiques et l'effet combiné avec les changements climatiques (Seidl et al., 2017). Les changements climatiques devraient donc avoir un effet direct sur la capacité des écosystèmes forestiers à soutenir une production ligneuse durable (Boucher et al., 2018; Brecka et al., 2020; Bouchard et al., 2022), ce qui accroît d'autant plus les incertitudes déjà importantes des stratégies basées sur l'augmentation des volumes de bois récolté. Il est aussi important de considérer que des perturbations naturelles et/ou anthropiques fréquentes peuvent contribuer à accélérer l'effet des changements climatiques sur les dynamiques d'un écosystème forestier (Brice et al., 2019). L'imminence d'un impact significatif des changements climatiques sur les sociétés (Ipcc, 2018) ne fait qu'exacerber la pression sur les solutions théorisées pour lutter contre. Dans une volonté de développement d'une stratégie sectorielle performante autant à court qu'à long terme, il faut néanmoins arriver à s'extraire de cette vision qui incite au court-termisme. La prise de recul est nécessaire pour permettre d'avoir une vision d'ensemble sur une temporalité plus large. Il faut à tout prix éviter la mise en place de stratégies bénéfiques sur le court terme, mais qui viendraient à devenir néfastes sur le moyen ou long terme. Il se pose alors un questionnement important et incontournable sur l'agencement de solutions dans le temps, et des actions qui en découlent, afin de garantir le déploiement d'un potentiel de lutte maximal, quelle que soit la temporalité observée.

Objectif

Compte tenu des caractéristiques uniques du secteur forestier québécois et de l'état des connaissances actuelles issues de la littérature scientifique sur son potentiel d'atténuation dans la lutte contre les changements climatiques, il est primordial de développer des connaissances spécifiques au territoire de la forêt commerciale productive du Québec. Ce développement de connaissances passe par l'utilisation de modélisations et la simulation de stratégies sectorielles alternatives afin d'anticiper au mieux, dans le temps et l'espace, les impacts possibles des actions d'atténuation décrites dans la littérature. C'est dans cette optique que ce travail vise, en tenant compte des flux de GES issus des processus écologiques des écosystèmes forestiers, des flux de GES issus de la décomposition des produits du bois et de l'effet de substitution qu'ils peuvent avoir sur les marchés, à répondre à un objectif principal : Évaluer le potentiel d'atténuation du secteur forestier québécois, en identifiant les obstacles à éviter et les opportunités à saisir, afin de développer une stratégie sectorielle efficace dans la lutte contre les changements climatiques.

Discussion générale

Synthèse de l'impact des actions d'atténuation

La détermination d'une stratégie sectorielle pertinente, robuste et adéquate, quelle que soit la temporalité observée, est un enjeu majeur pour la province du Québec. Il est aujourd'hui temps de sortir d'une vision idéalisée d'un secteur forestier vecteur de bénéfices climatiques incontestables pour en accepter ses faiblesses et ses limites. Sans un constat réaliste et objectif de l'impact de la mise en place de stratégies alternatives dans la lutte contre les changements climatiques, le déploiement d'actions d'atténuation ne pourra pas être optimisé, et pourrait même conduire à la mise en place d'initiatives contreproductives.

Dans un esprit de synthèse, il est possible de rassembler dans un Tableau l'ensemble des actions potentielles qui pourraient faire du secteur forestier québécois un outil de lutte contre les changements climatiques (Tableau 1). L'action de boisement est ajoutée à ce tableau même si c'est une action exclue de mes travaux de recherche. Cela permet ainsi de refléter au mieux les potentielles avenues d'atténuation pour le secteur forestier. En associant une valeur numérique à une caractérisation qualitative de l'effet potentiel à court terme, à moyen terme et long terme ainsi qu'au degré d'incertitude d'une action d'atténuation, il est possible de faire émerger un facteur de réalisation du potentiel (FRP) propre à chaque action (Tableau 1). La caractérisation qualitative de l'effet potentiel d'une stratégie est basée sur l'expertise de l'auteur et ne représente donc pas des seuils spécifiques, mais plutôt des tendances. Dans le cas présenté ici, le calcul du FRP suit la formule :

$$FRP = [(Effet court terme * 3) + (Effet moyen terme * 2) + (Effet long terme * 1)] / (Degré d'incertitude)$$

La caractérisation de l'effet sur le potentiel d'atténuation d'une action d'atténuation est réalisée par rapport à la stratégie de référence du secteur forestier québécois. Afin de répondre à l'urgence climatique, un poids plus important a été donné aux effets d'atténuation dont les impacts pourraient se faire ressentir sur le court terme (multiplicateur de 3) ou sur le moyen terme (multiplicateur de 2) plutôt que sur le long terme (multiplicateur de 1). Le FRP (Tableau 1) est donc déterminé de manière individuelle et ne prend pas en compte les possibles

synergies associées à l'action d'atténuation considérée dans le calcul. Une valeur positive représente alors un potentiel bénéfique climatique, et inversement pour des valeurs négatives. Plus le FRP a une valeur élevée, qu'elle soit positive ou négative, plus l'action concernée peut avoir un impact réalisable pour le secteur forestier provincial.

La justification des impacts, des incertitudes associées, les analyses du FRP et les synergies propres à chacune des actions d'atténuation présentées dans le Tableau 1 vont être développées dans les parties suivantes de cette discussion générale.

TABLE 1 – Les clés d’amélioration du potentiel d’atténuation du secteur forestier québécois dans la lutte contre les changements climatiques.

Actions théoriques	Effet attendu sur le potentiel d’atténuation			Incertitude	Facteur RP ¹	Synergies
	<i>Court terme</i>	<i>Moyen terme</i>	<i>Long terme</i>			
Aménagement	Conservation	Nul (0)	Bénéfique (1)	Très bénéfique (2)	1.3	
		Nul (0)	Mauvais (-1)	Très mauvais (-2)	Très élevé	
	Intensification	Nul (0)	Bénéfique (1)	Très bénéfique (2)	1.3	
		Nul (0)	Mauvais (-1)	Très mauvais (-2)	-1.3	
Effet de substitution²	Très bénéfique (2)	Bénéfique (1)	Nul (0)	Très élevé (3)	2.7	
Innovation des produits	Bénéfique (1)	Très bénéfique (2)	Très bénéfique (2)	Élevé (2)	6	
	Très bénéfique (2)	Très bénéfique (2)	Très bénéfique (2)	Faible (1)	12	
Gestion des émissions en fin de vie (CO₂, CH₄)	Nul (0)	Bénéfique (1)	Très bénéfique (2)	Élevé	2	
	Nul (0)	Mauvais (-1)	?	(2)	-1	
Boisement	Bénéfique (1)	Très bénéfique (2)	Très bénéfique (2)	Faible (1)	9	

¹Facteur RP : Facteur de réalisation du potentiel = [(Effet court terme *3) + (Effet moyen terme * 2) + (Effet long terme *1)] / Incertitude

²Sur le principe de DF dégressifs.

L'aménagement du territoire

Aménagement des territoires forestiers productifs

Mes travaux de recherche (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a) démontrent le poids très important de la dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers pour atteindre un potentiel d'atténuation bénéfique, dans un contexte d'aménagement des territoires forestiers productifs (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Si la coupe entraîne invariablement des émissions de carbone vers l'atmosphère, l'atteinte d'un potentiel d'atténuation bénéfique pour le climat dépend en grande partie de la dynamique du carbone dans le réservoir de matière organique morte (Moreau et al., 2022, 2023a). Il est donc essentiel de réduire l'importance et la durée de la période d'émission de carbone post-récolte. C'est d'ailleurs dans cette optique que les types de coupe alternatifs (coupes partielles) pourraient tirer leur épingle du jeu en évitant, au moins en partie, la déperdition de carbone post-récolte constatée après une CPRS, tout en envoyant des produits du bois sur les marchés (Moreau et al., 2023a). Un allongement du cycle des rotations sylvicoles, périodes sans aménagement, pourrait aussi avoir un effet bénéfique en accentuant la période de séquestration de l'écosystème (Moreau et al., 2023a), élément d'autant plus important lorsque l'on considère avec une attention plus particulière la temporalité des émissions. La considération de la dynamique post-récolte du carbone comme outil bénéfique au potentiel d'atténuation est valide à la fois pour les scénarios qui visent à réduire comme à augmenter les volumes récoltés. La mise à l'échelle du paysage de tels éléments permet d'expliquer le fait que la hausse du volume récolté annuellement (multiplication des peuplements qui sont des sources de carbone), par rapport à un niveau de référence, conduit la partie forêt à être une source de carbone à moyen comme à long terme, c.-à-d., à avoir un potentiel d'atténuation positif. Les changements de niveaux de récolte graduels et l'inertie inhérente aux dynamiques naturelles des paysages ne font pas émerger d'effet carbone significatif sur le court terme dans la province (Moreau et al., 2023b, 2022). Ces résultats généraux sont en lien avec ceux d'une méta-analyse (Soimakallio et al., 2022) de 45 études sur les forêts tempérées et boréales, qui montre qu'une augmentation du volume récolté a un impact négatif sur les stocks de carbone dans les écosystèmes forestiers.

Pour autant, le fait de réduire les volumes récoltés n'est pas forcément gage de bénéfices climatiques. Si les écosystèmes forestiers sont un puits de carbone, donc avec un potentiel d'atténuation négatif (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a), il n'en demeure pas moins que de larges incertitudes et limites méritent d'être discutées. Le premier point est étroitement relié à la notion de saturation des écosystèmes forestiers. La capacité de séquestration de carbone des vieux peuplements, c.-à-d., n'ayant pas ou peu subi de perturbation, est souvent remise en cause sur le long terme (Gao et al., 2018; Smyth et al., 2020; Gundersen et al., 2021; Harel et al., 2021), et les dynamiques carbone dans ces peuplements sont donc largement débattues dans la littérature. Au contraire, les stratégies de récolte peuvent préserver la dynamique de séquestration des écosystèmes à travers les perturbations anthropiques effectuées dans un

cadre de gestion durable des territoires forestiers (Pugh et al., 2019) et ainsi avoir à long terme un meilleur potentiel d'atténuation (Pettersson et al., 2022). De plus, les stratégies qui donnent la priorité à la diminution des volumes récoltés, peuvent être plus vulnérables à la perte de carbone à la suite de perturbations naturelles, étant donné la présence d'une grande quantité de forêts matures et anciennes générées par ces stratégies (Sharma et al., 2013; Houndode et al., 2021). Cela représenterait une perte de carbone d'autant plus problématique que les stocks de ces écosystèmes sont importants.

Cependant, Moreau et al. (2022) tout comme Smyth et al. (2014), illustre qu'à l'échelle provinciale les stratégies d'augmentation et de réduction du volume récolté peuvent coexister afin de maximiser le potentiel d'atténuation du secteur forestier. Certains écosystèmes forestiers, notamment ceux dégradés dans le sud de la province, pourraient en effet bénéficier des perturbations de récolte pour se régénérer et ainsi redynamiser leur productivité. Ce gain serait cependant trop faible en forêt boréale pour compenser les pertes de carbone post-récolte et ainsi favoriser les stratégies d'augmentation du niveau de récolte (Moreau et al., 2022). Ces variations entre les paysages sont largement induites par des caractéristiques initiales différentes héritées de l'aménagement passé (structure d'âge, composition en essences, etc.), qui a conduit certains territoires forestiers du sud de la province à voir leur productivité se dégrader dans le temps (Bédard and Majcen, 2003; Kenefic et al., 2014; Prévost and Charette, 2019).

Enfin, une incertitude fondamentale associée aux diminutions des volumes récoltés est le risque très important de fuites de carbone. La diminution de la récolte au sein de la province du Québec entraînera une augmentation de la récolte dans d'autres juridictions où l'encadrement de l'aménagement des territoires forestiers pourrait être moindre (Nabuurs et al., 2007; I. Kallio and S., 2018). Ces fuites de carbone pourraient significativement compromettre l'efficacité des stratégies de réduction des volumes récoltés à l'échelle de la province due à la connectivité entre les marchés internationaux des produits du bois (Gan and McCarl, 2007; I. Kallio and S., 2018). Ce risque de fuite existe autant pour les stratégies d'augmentation que de réduction du volume récolté (I. Kallio and S., 2018) et pourrait couvrir de 60 à 100% de la variation de volume engendrée par la mise en place d'une stratégie alternative de récolte (Nepal et al., 2013; Hu et al., 2014; I. Kallio and S., 2018). Étant donné que la demande en ressources biosourcées va très certainement augmenter dans les décennies à venir (Hurmekoski et al., 2023), on peut légitimement poser l'hypothèse que les risques de fuite de carbone dans un contexte de réduction de la récolte au niveau de la province de Québec seront accentués.

Un autre élément d'incertitude prépondérant à considérer dans l'impact de l'aménagement des territoires forestiers productifs de la province est l'effet des changements climatiques. En effet, l'intensité du forçage climatique est déterminante dans la capacité des écosystèmes forestiers à agir en tant que puits de carbone (Montoro Girona et al., 2023; Hof et al., 2023). Moreau et al. (2022) démontre aussi que l'effet des changements climatiques ne sera pas le même selon le type de paysage analysé et qu'une synergie pourrait même exister entre l'aménagement et

l'effet des changements climatiques dans les territoires du sud de la province. Les changements climatiques devraient donc avoir un effet direct sur la capacité des écosystèmes forestiers à soutenir une production ligneuse durable (Boucher et al., 2018; Brecka et al., 2020; Bouchard et al., 2022), ce qui accroît d'autant plus les incertitudes, déjà importantes, des stratégies basées sur l'augmentation des volumes de bois récolté. L'aménagement forestier garde tout de même un rôle significatif dans l'adaptation des paysages à ses caractéristiques futures (Messier et al., 2019; Mina et al., 2021). Par exemple, les opérations de récolte pourraient cibler les peuplements les plus susceptibles aux épidémies d'insectes, aux incendies ou à la diminution de la productivité, réduisant ainsi les impacts de ces événements sur la productivité des écosystèmes (Hennigar and MacLean, 2010; MacLean et al., 2007). L'aménagement permettrait également de gérer activement la composition en espèces des peuplements, mais aussi la connectivité des peuplements et des paysages pour augmenter leur résistance et leur résilience face à un climat changeant (Messier et al., 2019; Mina et al., 2021). Il est aussi important de considérer que des perturbations naturelles et/ou anthropiques fréquentes peuvent contribuer à accélérer l'effet des changements climatiques sur les dynamiques d'un écosystème forestier (Brice et al., 2019), comme c'est le cas dans les simulations pour le sud de la province de Québec (Moreau et al., 2022). L'aménagement du territoire aura donc un effet conséquent sur les effets des changements climatiques sur les dynamiques de carbone au sein des écosystèmes et donc sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier québécois.

En considérant les éléments avancés dans cette section sur l'aménagement des territoires forestiers productifs, il est crucial de souligner la grande variabilité dans les impacts induits par les alternatives d'aménagement menant à une modification du volume de bois récolté sur le potentiel d'atténuation d'une stratégie alternative (Tableau 1). À cette grande variabilité s'ajoute un degré d'incertitude très élevé (Tableau 1). Le FRP calculé (Tableau 1) peut alors être considéré comme faible (-1.3 à 1.3). Un FRP si proche de zéro souligne le faible effet à court terme des actions d'aménagement couplées aux grandes incertitudes qui y sont reliées.

Boisement et reboisement des territoires forestiers improductifs

L'augmentation de la superficie des forêts productives, que ce soit par boisement de territoires non productifs ou le reboisement de territoires improductifs, est un outil reconnu dans la lutte contre les changements climatiques en permettant un accroissement de la séquestration de carbone par la végétation, accroissement de la productivité, tout en permettant la récolte de bois (Nabuurs et al., 2007; Kurz et al., 2013). La question de l'effet de telles stratégies sur l'effet d'albedo reste cependant à déterminer pour pouvoir en mesurer les effets radiatifs réels (Nabuurs et al., 2022).

Plusieurs études récentes permettent de mieux appréhender le rôle du boisement/reboisement dans la province de Québec (Ménard et al., 2022a,b; Thibault et al., 2022). Si à terme le bénéfice climatique associé à un reboisement est relativement certain dans les territoires fo-

restiers peu productifs, comme les dénudés secs et les brûlis mal régénérés (Ménard et al., 2022a,b), ce bénéfice climatique est bien plus hypothétique lorsqu'un boisement à lieu sur des friches agricoles non forestières (Ménard et al., 2022b; Thibault et al., 2022). Du fait de la dynamique du carbone qui y est associé, la récolte de matière ligneuse a d'importants impacts sur le potentiel d'atténuation des scénarios de boisement et de reboisement, les plus grands bénéfiques climatiques sont associés à une absence de récolte des plantations (Ménard et al., 2022b).

Comme pour l'aménagement forestier des territoires productifs, la détermination d'un scénario de référence robuste est nécessaire afin de déterminer le plus précisément possible le potentiel d'atténuation réel engendré par une stratégie de boisement de territoires non forestiers ou de reboisement de territoires improductifs. Pour ce faire un développement des connaissances sur la dynamique naturelle de succession végétale est primordial (Ménard et al., 2022b; Thibault et al., 2022). C'est pourquoi peu de risques sont pris dans le boisement et la restauration de sites hautement anthropisés où la séquestration actuelle de carbone par la végétation en place peut être actuellement déterminée comme absente ou très faible (milieux urbains, territoires pollués, etc.). Tout comme pour l'aménagement des territoires productifs, l'impact des changements climatiques se fera ressentir sur l'ensemble des projets de boisement ou reboisement (Montoro Girona et al., 2023; Hof et al., 2023).

En considérant les éléments avancés dans cette section sur le boisement de territoires non productifs ou le reboisement de territoires improductifs, il est essentiel de souligner la grande variabilité dans les impacts induits par les alternatives d'aménagement par boisement ou reboisement. Le degré d'incertitude repose essentiellement sur l'impact réel des changements climatiques, les risques de fuites étant bien plus faibles au regard des superficies concernées, et peut donc être considéré comme élevé en milieu naturel (Tableau 1). En milieu fortement anthropisé, cette incertitude demeure, mais peut être cependant considérée comme faible au vu du bénéfice de séquestration substantiel engendré par rapport à la référence. Le FRP calculé (Tableau 1) est alors de deux types; relativement faible lorsque considéré pour un milieu naturel (-1 à 2) et élevé, lorsque considéré pour un milieu anthropisé (9). Le boisement de sites anthropisés apparaît donc comme un élément hautement valorisable dans le déploiement d'une stratégie sectorielle de lutte contre les changements climatiques.

La substitution

L'effet de substitution est un des atouts théoriques majeurs du secteur forestier, en remplaçant des matériaux ou des sources d'énergie à l'empreinte carbone importante on pourrait ainsi venir limiter significativement les émissions de GES produites par la société (Sathre and O'Connor, 2010). L'effet de substitution est toujours opposé aux émissions de décomposition des produits du bois (plus de produits donnent plus de séquestration de substitution, mais aussi plus d'émissions de décomposition) et permet au mieux de contrebalancer ces émissions

que sur une très courte période (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Il apparaît donc clairement que l’effet de substitution, tel que simulé actuellement pour le secteur forestier québécois, est largement insuffisant pour répondre aux attentes placées en lui (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Bien que couramment considérée, lorsque du bois est envoyé sur les marchés, la substitution n’est jamais évaluée, à ma connaissance, pour des stratégies alternatives basées sur une diminution du volume de bois récolté. Si l’offre en matière première bois vient à diminuer, il paraît certain que des alternatives de consommation verront le jour et le besoin en bois sera remplacé par des matériaux à l’empreinte carbone plus ou moins importante. C’est ce que l’on a déterminé comme étant une substitution négative. Cependant, les travaux n’ont évalué que les effets de substitution négatifs dans certaines catégories de produits telles que le bois scié et les panneaux. Cela néglige donc la possible substitution négative des produits à base de papier (emballages, cartons, etc.) par des alternatives qui pourraient avoir des émissions de gaz à effet de serre plus élevées. Il apparaît donc que la substitution négative déterminée dans mes travaux pourrait être sous-évaluée (Gustavsson et al., 2022).

En combinant les travaux de Beaugard et al. (2019) avec ceux de Moreau et al. (2023b), il est possible d’évaluer l’effet de substitution au niveau provincial, et donc plus particulièrement le facteur de déplacement moyen pondéré par le panier de produits de référence pour la province (0.9 tC/tC). Ce facteur moyen ne prend en compte que les produits sous substitution, excluant donc les produits des pâtes et papiers. Les méta-analyses et revues de littérature consacrées au sujet de l’effet de substitution des produits du bois dans les pays développés occidentaux donnent des résultats très variables, mais qui semblent cependant de moins en moins optimistes les années passantes. En effet, si en 2010 Sathre and O’Connor (2010) indiquaient un facteur de déplacement moyen de 2.1 tC/tC, ce facteur fut réduit à 1.2 tC/tC dans Leskinen et al. (2018). Cette valeur passe même à 0.55 tC/tC dans Hurmekoski et al. (2021) en considérant l’ensemble du panier de produits. Des facteurs de déplacement plus importants se retrouvent aussi dans la littérature, mais sont souvent utilisés pour des produits particuliers ou des utilisations spécifiques et peuvent donc difficilement être utilisés à plus grande échelle (Xu et al., 2018; Cordier et al., 2021). Les facteurs de déplacements utilisés dans mes travaux (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a) sont représentatifs de la littérature actuelle et leur insuffisance dans la compensation des émissions de GES lié à un aménagement forestier basé sur l’augmentation des volumes récoltés ne s’explique donc pas par une sous-évaluation des effets de déplacement propres aux produits considérés dans les modélisations.

De plus, une problématique émerge invariablement, dans la simulation d’alternatives d’aménagement forestier visant à l’augmentation des niveaux de récolte, est la capacité des marchés à absorber l’entièreté des volumes de bois supplémentaires et à engendrer une substitution optimale Xie et al. (2021, 2023). En lien avec cette problématique découle aussi une limitation inhérente à mes travaux, celle de la non-considération de la substitution potentielle engendrée par les produits du bois rentrant dans la catégorie des pâtes et papier. Cette limitation

pourrait prendre une importance de plus en plus grande avec le déploiement à grande échelle d'innovations qui utilisent le bois comme matière première (textiles, emballages, etc.) (Hurmekoski et al., 2018, 2022), mais dont le potentiel de substitution reste encore à être calculé (Leskinen et al., 2018).

Si cet élément indique une possible sous-évaluation du périmètre des produits sous substitution, d'autres éléments issus de la littérature indiquent que l'effet de substitution pourrait être largement surévalué (Harmon, 2019; Howard et al., 2021; Brunet-Navarro et al., 2021). Cette surévaluation pourrait être de l'ordre de 2 à 100 fois selon Harmon (2019), en grande partie dû à des hypothèses de détermination des facteurs de déplacement qui ne reflèteraient pas la réalité des marchés. Il est alors essentiel de rendre compte de manière plus réaliste les processus de substitution sur les marchés des produits forestiers, afin de faciliter la prise de décision et la mise en place de politiques visant à réduire les émissions de GES (Hurmekoski et al., 2022).

Parmi les hypothèses les plus problématiques, on retrouverait donc tout d'abord la question de permanence de la substitution dans le temps (Harmon, 2019). En effet, les combustibles fossiles non utilisés pour la production de matériaux remplacés par le bois feraient l'objet, pour plus de 75%, de fuite dans d'autres secteurs de production (Harmon, 2019). Ensuite, l'hypothèse d'une absorption constante du bois supplémentaire par les marchés (Howard et al., 2021) est aussi à discuter. L'augmentation de la consommation n'est pas seulement liée à la quantité de matière disponible sur les marchés, les politiques notamment ont un impact parfois bien plus important (Howard et al., 2021; Harmon, 2019). Or les décisions politiques sont difficiles à prévoir, ce qui ajoute de larges incertitudes à l'hypothèse posée préalablement par le concept de substitution. Le type de produits rendu disponible est aussi un facteur important d'imprégnation sur le marché, la demande est elle suffisante pour absorber l'offre excédentaire par rapport au cours normal des affaires. La ressource pourrait donc ne pas être utilisée à son plein potentiel de substitution (Harmon, 2019; Howard et al., 2021; Xie et al., 2023). Finalement c'est le principe même que le marché ne réagisse pas à cet apport de bois par une variation de prix ou par des fuites (offre de bois moins importante dans d'autres juridictions) qui peut être remis en cause, surtout dans une temporalité qui dépasse la décennie (Harmon, 2019; Howard et al., 2021). Au-delà même des considérations méthodologiques propres à la détermination des facteurs de déplacement, c'est leur utilisation actuelle dans les exercices de modélisation qui peut être remise en cause. En effet, l'utilisation de facteurs de déplacement fixes dans le temps sous-entend qu'on ne prend pas en compte les améliorations, c.-à-d., la diminution des émissions de GES, possibles dans les secteurs concurrents (acier, béton, énergie, etc.). Or, toute amélioration dans ces secteurs aura pour conséquence effective une diminution de l'effet de substitution du bois (Harmon, 2019; Brunet-Navarro et al., 2021). La simulation de stratégies alternatives en utilisant un facteur fixe, ne représente donc, dans les faits, que le potentiel maximal de substitution, l'effet réel est certainement moindre. Brunet-

Navarro et al. (2021) indique même que la baisse de l'effet de substitution des produits du bois pourrait avoisiner 33% en 2030 et jusqu'à 96% en 2100.

Ainsi, en raison de ces sources d'incertitude importantes, il ne semble pas approprié pour le secteur forestier de compter uniquement sur l'effet de substitution des produits du bois comme justification à la mise en place de stratégies sectorielles basées sur l'augmentation du volume récolté (Hurmekoski et al., 2023). Afin de limiter les incertitudes méthodologiques et d'utilisation de l'effet de substitution, j'ai utilisé dans Moreau et al. (2023b) une méthode de détermination du facteur de déplacement requis (Seppälä et al., 2019). Conceptuellement, ce n'est plus la littérature qui fournit les intrants de déplacement potentiel lié aux produits du bois, mais ce sont les simulations qui font émerger l'effet de substitution nécessaire, et donc le facteur de déplacement moyen nécessaire, à l'atteinte d'un objectif préalablement fixé. C'est une méthodologie encore peu utilisée, mais qui permet de s'affranchir de certaines limitations engendrées par l'utilisation de facteurs de déplacements.

En considérant les éléments avancés dans cette section, il est important de souligner l'important effet à court terme de la substitution sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier (Tableau 1). Cependant, il faut aussi en mesurer les limites importantes dans un futur proche et le besoin de reconsidérer la manière de déterminer les facteurs de déplacement dont la substitution est issue. C'est pourquoi le FRP calculé (Tableau 1) pour la substitution prise individuellement est relativement faible (2.7). La substitution seule est largement insuffisante pour répondre aux attentes placées en elle.

L'innovation dans les produits du bois

L'utilisation du bois comme matière première est en constante augmentation dans le monde et tend à gagner des parts de marché, exception faite de l'industrie du papier d'impression. Pourtant historiquement dominée par la production de bois d'œuvre et de papier, une très grande variété de produits est aujourd'hui issue de la biomasse forestière. Ce phénomène est notamment favorisé par les besoins du secteur de la construction de remplacer les produits à forte empreinte carbone massivement utilisés jusqu'à présent (Hurmekoski et al., 2018, 2023). De nombreux produits du bois innovants sont déjà fabriqués à l'échelle industrielle (bois d'ingénierie, etc.) et devraient être rejoints prochainement par de nouveaux produits à fort potentiel, comme les mousses à base de fibre de bois, les adhésifs à base de lignine, les glycols, les bioplastiques ou bien encore les fibres textiles (Hurmekoski et al., 2018; Hassegawa et al., 2022; FAO, 2022). Un des principaux avantages de ces nouveaux produits du bois repose sur le peu d'exigences en matière de qualité de la biomasse nécessaire à leur fabrication, et nombre d'entre eux peuvent également être produits à partir de ce que l'on considère actuellement comme des déchets de l'industrie forestière et papetière (Hassegawa et al., 2022) ou des bois de faible qualité (Hurmekoski et al., 2020).

Moreau et al. (2023b) supporte l'idée qu'un changement dans le panier de produits du bois a un impact très important sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier. Une faible augmentation de la proportion des produits à longue durée de vie (bois de sciage et autres matériaux de construction) au détriment des produits à faible durée de vie (pâtes et papier) augmente le stock de carbone dans le réservoir des produits du bois en repoussant dans le temps les émissions de décomposition (Smith et al., 2014; Chen et al., 2018a,b; Dugan et al., 2018; Parobek et al., 2019). Les produits du bois à longue durée de vie sont aussi souvent associés dans les lieux d'enfouissement à des taux et des proportions de décomposition plus faibles que les produits à courte durée de vie (MELCCFP and MAPAQ, 2022). Une augmentation de leur proportion a donc le potentiel de réduire drastiquement les émissions en fin de vie (Chen et al., 2014). Une reconsidération de la fin de vie des produits du bois par le développement d'utilisations alternatives à l'enfouissement devrait aussi avoir un impact substantiel sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier (Brunet-Navarro et al., 2018).

Si théoriquement une telle modification du panier de produits vers un accroissement de la proportion de produits à longue durée de vie est fortement bénéfique pour le secteur forestier québécois dans la lutte contre les changements climatiques, la réalité d'un tel changement est soumise à des incertitudes réglementaires, économiques et un besoin d'innovations. En règle générale, les entreprises rencontrent des obstacles dans le processus d'introduction ou d'expansion de leurs produits sur les marchés, et la facilité avec laquelle les innovations peuvent être introduites sur le marché dépend principalement de leur capacité à s'adapter aux chaînes de valeur existantes (FAO, 2022; Hassegawa et al., 2022). Un des principaux freins au développement d'alternatives biosourcées est leur compétitivité économique, notamment lorsqu'elles rentrent en compétition avec des combustibles fossiles bon marché. Il faut aussi prendre en compte le besoin de financement lié à la modernisation des lignes de production et au développement d'une main-d'œuvre qualifiée. Les produits qui nécessitent des ajustements significatifs dans les chaînes de production sont alors moins susceptibles d'être introduits et compétitifs sur les marchés sans des facteurs externes puissants (FAO, 2022; Hassegawa et al., 2022). Ces facteurs externes incluent principalement la mise en œuvre de politiques publiques visant à encourager la transition vers l'utilisation d'alternatives biosourcées. Cela implique des changements de réglementations telles que des réformes du code de la construction. Il est également question d'un soutien à la recherche et à l'innovation, qui peut prendre la forme de partenariats public-privé en étroite collaboration avec les entreprises et leurs besoins. Enfin, il est important de sensibiliser davantage les acteurs intermédiaires tels que les architectes ou les ingénieurs, ainsi que les consommateurs finaux (Vihemäki et al., 2019; FAO, 2022; Hassegawa et al., 2022).

Le gouvernement provincial du Québec semble porter une volonté forte de répondre à l'enjeu de l'utilisation de la biomasse forestière dans le secteur de la construction avec sa *Politique d'intégration du bois dans la construction* et son plan de mise en œuvre 2021-2026. Ce plan

reprend d'ailleurs les points évoqués plus haut en y ajoutant un engagement gouvernemental à l'exemplarité dans l'utilisation du bois dans les constructions qu'il finance (MFFP, 2021a). Si une telle volonté politique existe pour le secteur de la construction, elle devra s'étendre aux secteurs aujourd'hui moins développés (textiles, chimie, etc.) pour maximiser le potentiel d'innovation de la ressource bois.

Le temps de stockage du carbone dans les produits du bois est un facteur très important dans les études sur le carbone forestier, notamment car il induit la temporalité des émissions de décomposition. En accord avec les recommandations du GIEC, ce temps peut être calculé de trois manières différentes (Rüter et al., 2019) ; soit par oxydation instantanée avec l'hypothèse que l'oxydation a lieu l'année de la récolte, soit par désintégration de premier ordre en utilisant des demi-vies par défaut et suivant une loi exponentielle, soit finalement avec une méthodologie différente, mais au moins aussi rigoureuse que la désintégration de premier ordre (demi-vie spécifique, changement de loi mathématique, etc.). Dans les modèles de produits du bois (HWP) utilisés dans mes travaux (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a), les mises hors service des différents produits du bois sont basées sur une fonction de décroissance exponentielle avec des valeurs de demi-vie (désintégration de premier ordre). Les valeurs par défaut suggérées par le GIEC furent utilisées (IPCC, 2014) : 2 ans pour les produits de pâte et de papier, 25 ans pour les panneaux à base de bois et 35 ans pour les produits sciés. Cependant, le GIEC lui-même met en garde contre l'utilisation de ces valeurs en raison du manque d'évidences scientifiques suffisantes pour garantir leur utilisation (IPCC, 2014). Plusieurs études démontrent ainsi que les valeurs par défaut du GIEC pourraient être surestimées pour les produits du bois (Finland, 2010; Braun et al., 2016), quand d'autres études estiment quand à elles que ces valeurs pourraient être largement sous-estimées notamment pour le bois à destination du secteur de la construction (Skog, 2008; Iordan et al., 2018). Il est donc primordial de raffiner la robustesse de ces valeurs (IPCC, 2014; Rüter et al., 2019). La prémisse de la désintégration de premier ordre est que le taux de retrait d'un réservoir est proportionnel à la quantité d'éléments dans ce dernier. Donc, cette hypothèse a pour conséquence qu'une proportion importante des produits du bois est mise hors service dès les premières années après leur mise en marché, le taux de mise hors service étant alors à son maximum. Si l'impact est anecdotique sur les produits avec de faibles durées de vie (papier, carton, etc.), il est bien plus important pour les produits à longue durée de vie (sciage, panneaux, etc.). Marland et al. (2010) émet donc l'hypothèse que s'il est vrai qu'un produit particulier se dégrade avec une certaine probabilité à différents moments, cette probabilité devrait être plus élevée à l'approche de la durée de vie prévue initialement. Pour transformer leur hypothèse en équation mathématique ils utilisent donc un modèle de distribution gamma et non plus exponentiel. D'autres études (Cherubini et al., 2012; Iordan et al., 2018; Zhang et al., 2020) utilisent une distribution Chi-carré dérivé d'une distribution gamma, mais nécessitant seulement comme intrant la valeur de demi-vie des différents produits ou agrégats de produits. Cependant, une telle hypothèse de distribution peut être remise en question lorsque l'agrégation des

produits est trop importante. En effet, si sont utilisées les agrégations « Sciage », « Panneaux » et « Papiers » (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a), une distribution gamma (ou Chi-carré) pourrait ne pas représenter la diversité réelle de mise hors service des différents produits du bois constituant l'agrégation, notamment pour le sciage. Si, au contraire, la ventilation modélisée des produits est conséquente, une telle hypothèse de distribution (gamma, Chi-carré) paraît plus réaliste (Zhang et al., 2020). La distribution de la mise hors service des produits du bois dans le temps est donc très importante à connaître et raffiner ; elle devrait ainsi faire l'objet d'une attention particulière dans les recherches futures (Rüter et al., 2019; IPCC, 2014).

En considérant les éléments avancés dans cette section, il est primordial de souligner l'important effet que pourraient avoir des innovations dans les produits du bois, surtout si elles portent sur la valorisation d'une ressource de faible qualité pour le panier de produits actuel (1). Des incertitudes élevées reliées notamment au comportement des marchés existent cependant. Ces incertitudes viennent donc nuancer à la baisse un FRP qui demeure cependant élevé (6) (1), soulignant l'importance des produits du bois pour faire du secteur forestier un outil de lutte efficace contre les changements climatiques.

La gestion des émissions issue de la fin de vie des produits du bois

La sensibilité des stratégies alternatives au devenir des émissions de décomposition des produits du bois dans les lieux d'enfouissement constitue un élément majeur de mes travaux. Dans les faits, peu d'études canadiennes, Chen et al. (2014) en est un rare exemple, mettent autant cet élément en avant que Moreau et al. (2023b).

La gestion des émissions de GES issues des lieux d'enfouissement sont pourtant un outil potentiel important de lutte contre les changements climatiques (Chen et al., 2014; Environment and Climate Change Canada, 2022b). Le cloisonnement des périmètres de comptabilité des émissions de GES initié par le GIEC est sûrement responsable du peu de considération des études forestières pour le devenir des produits du bois en fin de vie. La comptabilisation des flux de GES dans les écosystèmes fait en effet partie du périmètre du secteur « Affectation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (ATCATF), alors que les émissions de GES qui proviennent des lieux d'enfouissement font partie du secteur « Déchets » (Environment and Climate Change Canada, 2021). Bien que le secteur des Déchets soit parfois considéré, son impact et sa contribution aux résultats globaux sont souvent négligés (Smyth et al., 2014), ce qui peut cependant être volontaire comme dans Moreau et al. (2022, 2023a) afin de se focaliser sur la sensibilité d'autres éléments de l'étude. Moreau et al. (2023b,a) soulignent l'importance de bien considérer les émissions de GES des produits du bois dans les lieux d'enfouissement dans la conceptualisation d'une stratégie sectorielle pour le secteur forestier québécois. Selon les modèles utilisés dans mes travaux, la gestion de ces émissions, notamment celles de méthane, est un des leviers d'action le plus sensible pour faire de l'ensemble

du secteur forestier un outil efficace de lutte contre les changements climatiques (Moreau et al., 2023b). L'effet d'une meilleure gestion des GES dans les sites d'enfouissements aura un impact sur le bénéfice climatique potentiel du secteur forestier à court comme à long terme (Tableau 2). Une meilleure gestion dans les lieux d'enfouissement passe par la diminution des émissions de méthane et une diminution de la proportion de matière résiduelle dégradée (Tableau 2). En effet, l'émission de méthane par la décomposition en condition anaérobie d'une biomasse qui se serait normalement décomposée sous forme de dioxyde de carbone, oblige les lieux d'enfouissement à gagner en performance pour éviter d'avoir un effet réchauffant sur le climat (Tableau 2).

Il est ainsi pertinent de voir la mise en place, par les gouvernements provincial québécois et fédéral canadien, de protocoles qui visent à accroître la récupération et la destruction du méthane dans les lieux d'enfouissement (Gouvernement du Québec, 2021; Environment and Climate Change Canada, 2022a).

TABLE 2 – Détermination de la valeur en tCO₂eq des émissions de GES issues de la dégradation d'une tonne de carbone dans les lieux d'enfouissement en fonction de la proportion de carbone dégradé et de la proportion de méthane émise.

	Pourcentage de méthane dans les émissions totales								
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	
10%	0.535	0.703	0.872	1.040	1.208	1.377	1.545	1.713	
20%	1.070	1.407	1.743	2.080	2.417	2.753	3.090	3.426	
30%	1.605	2.110	2.615	3.120	3.625	4.130	4.635	5.140	
40%	2.140	2.813	3.487	4.160	4.833	5.506	6.180	6.853	
50%	2.675	3.517	4.358	5.200	6.041	6.883	7.725	8.566	
60%	3.210	4.220	5.230	6.240	7.250	8.260	9.269	10.279	
70%	3.745	4.923	6.102	7.280	8.458	9.636	10.814	11.993	

Note : Équation utilisée : $[(1 - \% \text{méthane}) * (3.667 * 1) + (\% \text{méthane}) * (1.33 * 28)] * \% \text{ carbone dégradé}$ (utilisation d'un PRG100 de 28 pour le méthane, 1.33 et 3.667 représente respectivement le poids de l'atome de carbone dans la molécule de CH₄ et de CO₂)
 Une valeur de couleur verte représente une valeur inférieure à celle d'une émission de GES résultant du brûlage ou de la décomposition aérobique (100% sous forme de CO₂) d'une tonne de carbone (égale à 3.667 tCO₂eq). Une valeur de couleur rouge représente une valeur supérieure.
 Les cellules du Tableau en brun transparent illustre la situation théorique utilisée dans Moreau et al. (2023b, 2022).
 Les cellules du Tableau en orange transparent illustre la situation théorique utilisée dans Moreau et al. (2023a).

Dans la mesure où l'analyse de sensibilité des émissions de méthane sur le potentiel d'atténuation des différentes stratégies alternatives dans le secteur forestier était méthodologiquement peu élaborée dans la littérature, il a fallu développer dans le cadre de Moreau et al. (2023b), un outil d'aide à l'analyse : la « Proportion d'émission de méthane requise » ($RCH_4\%$). À l'image du RDF dont il s'inspire, ce facteur détermine la valeur des émissions de méthane nécessaire pour que le bilan carbone d'un scénario alternatif soit égal au bilan carbone cumulé du scénario de référence pour une temporalité donnée, c.-à-d., un potentiel d'atténuation égal à zéro. C'est par cette analyse qu'est ressortie la sensibilité importante des potentiels d'atténuation aux variations de $RCH_4\%$. Cependant il convient, à la lueur de cette sensibilité, de garantir la meilleure modélisation possible de ces émissions de GES. Or, il s'avère que les intrants de modélisation du devenir des produits du bois et de leurs émissions dans les lieux d'enfouissement sont quelque peu éloignés de la réalité québécoise (BAPE, 2022; MELCCFP and MAPAQ, 2022). Ainsi, le devenir des matières résiduelles industrielles, le temps de demi-vie des produits du bois dans les lieux d'enfouissement, la proportion de carbone dégradé et le devenir ultime des émissions de méthane devront être ajustés dans les futures modélisations (BAPE, 2022; MELCCFP and MAPAQ, 2022). C'est un travail de mise à jour qui est en cours et qui est primordial pour l'analyse des impacts de la gestion des émissions de GES des lieux d'enfouissement dans l'élaboration d'une stratégie sectorielle adéquate. Il est dès lors justifié de se questionner sur l'impact de telles mises à jour sur les résultats observés. La plus faible proportion d'émissions de méthane dans les sites d'enfouissement industriels en comparaison des lieux d'enfouissement municipaux (50% moins importante), un temps de demi-vie dans les lieux d'enfouissement plus important pour certains produits du bois (sciage passant de 11.7 à 23 ans), une proportion de carbone dégradé plus faible (sciage passant de 60% à 10%, papier de 60% à 50%) et moins d'émissions directes de méthane à l'atmosphère (de 66% non récupérée à 33%) devront réduire substantiellement les émissions de décomposition des produits du bois. Le potentiel lié à la gestion des émissions de méthane pourrait donc être réduit, mais on peut aussi voir cela de manière optimiste, c.-à-d., comme la réalisation d'une partie du potentiel d'atténuation relevé dans mes travaux de recherche.

Les conclusions liées à la gestion des émissions de fin de vie des produits du bois restent néanmoins pertinentes. Principalement du fait que le potentiel d'atténuation sert de base aux analyses, donc même avec une diminution des émissions de décomposition des produits, la mise en marché de plus ou de moins de bois par rapport au scénario de référence aura toujours pour impact d'augmenter ou diminuer les émissions issues des produits. De plus, Moreau et al. (2023a) prend déjà en compte une partie de ces mises à jour, et même avec une diminution des émissions de méthane, les émissions de décomposition des produits du bois dans les lieux d'enfouissement jouent toujours un rôle central dans la détermination du potentiel d'atténuation des stratégies alternatives.

Si la gestion des émissions de méthane dans les lieux d'enfouissement est un outil pertinent dans la lutte contre les changements climatiques, l'évitement de telles émissions l'est tout autant (Brunet-Navarro et al., 2018). Pour se faire, le gouvernement du Québec base ses stratégies de gestion des matières résiduelles selon le principe des 3RV-E : Réduction à la source, Réemploi, Recyclage, Valorisation, Élimination (BAPE, 2022). Elle donne la priorité à la réduction à la source, au réemploi, au recyclage, à la valorisation, et enfin en dernier recours à l'élimination des déchets. Le gouvernement met ainsi de l'avant dans sa politique de gestion des matières résiduelles (MELCC, 2019) des mesures afin d'augmenter le recyclage du papier, du carton, des matières organiques et des résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD), notamment dans le cadre de la Stratégie de valorisation de la matière organique (MELCC, 2020). En Scandinavie, c'est jusqu'à 70% des produits en bois et 30% des produits en papier qui sont utilisés pour la production de bioénergie lors de leur fin de vie utile (Zubizarreta-Gerendiain et al., 2016), ce qui suggère qu'il n'y a pas de barrière technologique majeure pour en faire autant dans la province du Québec. Accroître la proportion de produits en bois et en papier qui sont détournés des sites d'enfouissement pourrait avoir un effet significatif sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier. La structuration de modélisation de la stratégie 3RV-E reste à raffiner dans les modèles, et s'il est possible de simplement augmenter le temps de demi-vie pour les produits recyclés ou réemployés qui gardent leur utilisation finale comme le papier par exemple, il est autrement plus complexe de considérer les changements d'utilisation à la suite de la valorisation d'un produit.

En considérant les éléments avancés dans cette section, il faut souligner l'important effet que pourrait avoir une meilleure gestion des émissions de GES issues de la fin de vie des produits du bois sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier. Les incertitudes qui entourent ce besoin de gestion alternative sont faibles et des projets commencent déjà à voir le jour dans la province (Tableau 1). De tels éléments conduisent au calcul d'un FRP de 12. C'est une valeur très élevée qui souligne l'importance à court comme à long terme de mieux gérer les émissions de GES issues de la fin de vie des produits du bois (Tableau 1).

Les synergies sectorielles

Mes travaux de recherche, et plus largement la littérature scientifique, tendent à démontrer que les actions d'atténuation discutées précédemment sont aux mieux insuffisantes, lorsque prises individuellement dans un contexte d'augmentation du volume récolté, pour faire de l'ensemble du secteur forestier québécois un outil efficace et durable de lutte contre les changements climatiques. Il est tout de même nécessaire de déployer dès aujourd'hui les actions d'atténuation qui ont les facteurs de réalisation du potentiel (FRP) les plus élevés (Tableau 1) : le boisement des territoires fortement anthropisés, la mise en place d'une gestion améliorée des émissions de fin de vie des produits du bois et un soutien à l'innovation des produits du bois. Il se trouve que ce sont aussi ces actions d'atténuation qui possèdent des synergies fortes

au sein du secteur forestier québécois (Tableau 1). La plus grande opportunité pour le secteur forestier se trouve donc certainement dans les synergies entre ces actions qui conduiront au déploiement d'une stratégie sectorielle pertinente dans la lutte contre les changements climatiques, c.-à-d., en prenant de concert l'impact des actions d'atténuation dans les écosystèmes forestiers et dans les produits du bois.

On peut tout d'abord noter que diverses synergies existent entre les éléments qui constituent les produits du bois (substitution, innovation des produits et la gestion des émissions dans leur fin de vie). Ainsi, une meilleure gestion des émissions en fin de vie, notamment les émissions de méthane, pourrait conduire à produire de nouveaux effets de substitution par l'utilisation du méthane comme source d'énergie (Chen et al., 2014). De plus, si les fonctions et la fin de vie des produits du bois sont tenues en compte dès les premières phases de développement, c.-à-d., leur utilisation, leur réutilisation, leur recyclage et/ou leur élimination, l'innovation peut avoir un effet très important sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier (FAO, 2022; Hasegawa et al., 2022). L'effet peut toucher non seulement la temporalité des émissions (Smith et al., 2014; Chen et al., 2018a,b; Dugan et al., 2018; Brunet-Navarro et al., 2018; Parobek et al., 2019), accroître le potentiel de substitution existant (Smith et al., 2014; Seppälä et al., 2019) ou supplémentaire par le remplacement de produits qui n'ont aujourd'hui aucune alternative biosourcée (FAO, 2022; Hasegawa et al., 2022), mais aussi, et surtout en altérant leur nature chimique, c.-à-d., en dioxyde de carbone ou en méthane (Chen et al., 2014).

Toute réduction des émissions de GES induite par un changement dans les produits du bois (substitution, innovation des produits ou la gestion des émissions dans leur fin de vie) entraînera un bénéfice climatique quelle que soit la stratégie d'aménagement des territoires forestiers productifs et improductifs mise en place, c.-à-d., basée sur l'augmentation ou la réduction du volume récolté. Si les produits du bois ont de fortes synergies avec l'aménagement forestier, l'inverse est aussi vrai. L'aménagement du territoire permet de gérer activement les caractéristiques des écosystèmes forestiers (composition en espèces, structure d'âge, diamètre des arbres, etc.) et cela permet donc d'influer sur les caractéristiques du bois récolté. Cet aménagement sera d'autant plus important que certaines essences (*Picea sp.*) actuellement valorisées par l'industrie du bois pourraient voir leur présence réduite, sous l'action des changements climatiques (Moreau et al., 2022), au profit d'essences qui sont aujourd'hui moins recherchées (*Fagus grandifolia*, *Populus sp.*). L'accroissement du diamètre moyen des arbres récoltés entraîne une production en plus grande proportion des produits en bois à longue durée de vie (Bureau de mise en marché des bois, 2018). Un aménagement qui viserait à accroître ce diamètre moyen aurait donc pour conséquence d'améliorer le potentiel d'atténuation de l'ensemble du secteur forestier en permettant la production plus importante de produits à longue durée de vie. L'utilisation de procédés d'aménagement encore peu utilisés dans la province pourrait aussi faire émerger de nouvelles opportunités, comme la récolte des résidus de coupe à des fins de bioénergie (Moreau et al., 2023b). Ces opportunités pourraient cepen-

dant s'avérer contreproductives, il faudra donc porter une attention toute particulière à bien tenir compte de la temporalité des émissions nouvellement engendrées et à la durabilité de la productivité des écosystèmes forestiers (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Le déploiement à très grande échelle de plantations dans un cadre de boisement de territoires non forestiers ou par le reboisement de territoires forestiers improductifs, pourrait aussi conduire à terme à l'augmentation de la récolte de bois de plus grande qualité et donc à une proportion de produits à longue durée de vie plus importante à l'échelle de la province. Ces opportunités pourraient cependant elles aussi s'avérer contreproductives (Ménard et al., 2022b,a).

Toutes les synergies qui dépendent des produits du bois seront d'autant plus importantes et nécessaires dans le futur que la demande en ressource biosourcée va continuer à s'accroître (FAO, 2022; Hassegawa et al., 2022; Hurmekoski et al., 2023), notamment dans le secteur de la construction. Pour répondre à la demande croissante, les volumes récoltés risquent alors d'augmenter. Or, sans la mise en œuvre de plusieurs actions d'atténuation et de leurs synergies, notamment dans les produits du bois, une telle augmentation de récolte ne peut pas aujourd'hui se justifier par de potentiels bénéfiques climatiques à l'échelle provinciale (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Mais elle le pourrait si et seulement si le déploiement d'une stratégie sectorielle se basait sur un accroissement du potentiel d'atténuation des produits du bois (Moreau et al., 2023b,a). Cela passerait notamment par la diminution ou la valorisation de la matière ligneuse de faible qualité. En effet, actuellement cette matière première (pâtes et produits dérivés du papier) n'a pas ou très peu d'effet de substitution (Beauregard et al., 2019), un temps de service relativement court (Rüter et al., 2019) et des émissions de méthane importantes en fin de vie (MELCCFP and MAPAQ, 2022). Toute innovation qui vise à valoriser ces produits en produits à plus longue durée de vie aura donc des effets très importants sur le potentiel d'atténuation des stratégies du secteur forestier provincial (Hurmekoski et al., 2020). Mais aussi par une meilleure substitution et une meilleure gestion des émissions de fin de vie des produits existants (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a).

L'existence de synergies à fort potentiel devrait permettre la mise en place d'une stratégie sectorielle cohérente basée sur l'ensemble des actions d'atténuation potentielles du secteur forestier québécois. Cette considération d'ensemble doit permettre la mise en œuvre d'un aménagement forestier provincial optimisé à ses paysages (aménagement adaptable) tout en tirant les plus grands bénéfices de la ressource engendrée (utiliser mieux). C'est une étape nécessaire pour permettre le développement d'une stratégie sectorielle efficace basé sur un objectif carbone, quelle que soit la temporalité considérée.

L'enjeu des considérations temporelles

La temporalité est un facteur de variabilité très important dans la détermination d'une stratégie sectorielle optimale dans la lutte contre les changements climatiques. C'est en effet un élément fondamental dans le périmètre de comptabilisation des potentiels d'atténuation, elle définit les bornes temporelles durant lesquelles les analyses vont être conduites. Lors d'une analyse à l'échelle du peuplement il devient évident que les conclusions tirées dépendent en grande partie des bornes temporelles choisies. La décision d'arrêter les analyses quelques années avant une coupe ou quelques années après peut mener à des conclusions totalement différentes, bien que toutes les deux soient une représentation réaliste de la situation. La détermination de la temporalité étudiée doit donc s'intégrer dès le départ dans les objectifs d'analyse et de recherche. Dans Moreau et al. (2023a), la temporalité se borne à ce qui pourrait être la prochaine rotation de coupe sous CPRS (60 ans). Il convient cependant de ne jamais oublier d'essayer d'intégrer les analyses dans une temporalité plus importante afin d'en déterminer les limites potentielles. Au contraire, dans une analyse à l'échelle du paysage, la variabilité due aux bornes temporelles choisies paraît moins importante de prime abord. En effet les impacts des actions d'atténuation (coupes, panier de produits, etc.) sur la dynamique du carbone sont souvent dilués dans une inertie plus globale, notamment dans les écosystèmes forestiers (Moreau et al., 2023b, 2022). Cette inertie du paysage a pour conséquence qu'un changement de stratégie d'aménagement du territoire n'a souvent des effets qu'à long terme (Tableau 1), notamment lorsque qu'une intensification de la production ligneuse est envisagée (Pettersson et al., 2022). Bien que le potentiel d'atténuation ait des variations moins brusques dans une analyse à l'échelle du paysage, les bornes temporelles posées peuvent tout de même influencer les conclusions qui en sont tirées. En effet, il ne faut pas occulter l'urgence climatique actuelle : Peut-on se permettre aujourd'hui de mettre en place d'une stratégie sectorielle, quelle qu'elle soit, qui apporterait potentiellement des bénéfices climatiques seulement dans plusieurs décennies ?

La temporalité joue aussi un rôle important dans la considération méthodologique des émissions de GES permettant de déterminer le potentiel d'atténuation. En effet, le fait de négliger la temporalité des émissions de GES peut conduire à des analyses erronées sur le véritable potentiel d'atténuation du secteur forestier et sur son impact réel sur le réchauffement climatique, comme le démontre Moreau et al. (2023a). La pratique courante dans la littérature sur le carbone forestier est d'analyser ces résultats en équivalent dioxyde de carbone (CO_2eq) durant une période préalablement déterminée, c'est la méthodologie choisie dans Moreau et al. (2023b, 2022) et dans une partie de Moreau et al. (2023a). Cette pratique se base sur la conversion des flux de GES ($\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}$) en CO_2eq par l'intermédiaire du PRG à 100 ans propre à chaque gaz. Il convient cependant de noter que l'utilisation d'un PRG unique pour analyser des résultats tels qu'utilisés aujourd'hui est fortement déconseillée (Brandão et al., 2013). En effet, le temps de résidence dans l'atmosphère des GES étant différent, p. ex., 12

ans pour le CH₄ à comparer aux milliers d'années du CO₂, la temporalité influe énormément sur la valeur de PRG, p. ex. PRG_{100ans} du CH₄ est égal à 25 alors que le PRG_{20ans} du CH₄ est égal à 72 (Forster et al., 2007). L'utilisation d'une valeur statique de PRG introduit donc souvent une incohérence entre les bornes temporelles de l'analyse et l'horizon temporel choisi pour le PRG (Levasseur et al., 2010). Cette incohérence est d'autant plus problématique qu'elle ne concerne que la partie décomposition des produits du bois de l'analyse sectorielle (Breton et al., 2018). La combinaison d'analyses des émissions en forçage radiatif dynamique, à opposer à l'utilisation d'une temporalité statique, peut donc fournir une représentation plus précise de l'impact des émissions et de la séquestration de carbone biogénique des écosystèmes forestiers, des émissions provenant de la décomposition des produits du bois et des effets de substitution (Breton et al., 2018). Si l'utilisation d'une telle analyse dynamique n'est pas l'unique solution pour pallier cette problématique, il est rare dans la littérature de trouver des résultats selon plusieurs temporalités de PRG (PRG_{500ans}, PRG_{100ans}, PRG_{20ans}). L'autre des principales limites de cette pratique par CO₂eq est le fait qu'elle sous-entend que la séquestration dans les écosystèmes forestiers d'une unité de CO₂eq est toujours équivalente à l'émission d'une unité de CO₂eq. Cette affirmation peut être vraie dans le contexte d'une temporalité très courte, mais elle peut largement être remise en question lorsque l'écart de temps entre les deux événements devient important. En effet, un équilibre entre émissions et séquestrations sur une période donnée n'assure pas un effet climatique neutre (Levasseur et al., 2010; Breton et al., 2018). Le pouvoir réchauffant, ou refroidissant, d'un potentiel d'atténuation doit donc être analysé selon la temporalité des émissions de GES qui le constituent afin d'en déterminer l'impact réel sur le climat. Cela est particulièrement important pour les études à l'échelle du peuplement, où la perte de carbone dans les écosystèmes suivant une récolte est significative et où la séquestration n'arrive que de nombreuses années plus tard (Moreau et al., 2023a). Les résultats en CO₂eq de Moreau et al. (2023b, 2022) ne sont pas pour autant erronés, mais possiblement sous-évalués. Les conclusions tirées de l'observation des tendances et des sensibilités observées restent correctes et en phase avec la littérature actuelle. L'utilisation d'analyse des émissions de GES par forçage radiatif dynamique (W.m²) pour l'ensemble du secteur forestier devrait également faciliter l'intégration de diverses études climatiques liées à la foresterie, telles que celles axées sur l'albédo et les composés organiques volatils (Kalliokoski et al., 2020; Kellomäki et al., 2021).

Mes travaux dressent un constat réaliste et objectif de l'impact de la mise en place de stratégies alternatives dans la lutte contre les changements climatiques pour le secteur forestier, le véritable déploiement d'actions d'atténuation ne pourra pas être véritablement optimisé sans la mise en place d'une véritable considération temporelle rigoureuse.

Conclusion générale

S'il n'y avait qu'une chose à retenir de mes travaux, cela serait que la prise en compte de l'aspect carbone en foresterie ne peut se faire en occultant certains des éléments qui constituent le secteur forestier, c.-à-d., les écosystèmes forestiers, les produits du bois et l'effet de substitution. Une sélection non exhaustive ne peut conduire qu'à des conclusions partielles qui pourraient s'avérer, dans le pire des scénarios, être contreproductives dans la lutte contre les changements climatiques. La complexité engendrée par une telle considération du secteur forestier ne doit pas être un frein à l'élaboration d'une stratégie sectorielle basée sur les connaissances scientifiques les plus à jour et l'acceptation des limites qui lui sont inhérentes. Ces travaux ont donc non seulement permis de répondre aux questionnements sur la temporalité des impacts des différentes actions d'atténuation, mais aussi à leur effet potentiel, au degré d'incertitude les entourant ainsi que sur leurs possibles synergies. Elle propose ainsi de répondre, à l'aide de l'évaluation du potentiel d'atténuation du secteur forestier provincial, à l'enjeu du développement d'une stratégie sectorielle efficace dans la lutte contre les changements climatiques.

Le secteur forestier est souvent considéré comme un moyen de lutter contre les changements climatiques en suivant l'idée selon laquelle la croissance de la végétation pourrait séquestrer une quantité illimitée de carbone si une récolte durable était pratiquée, évitant ainsi la saturation en carbone des écosystèmes forestiers. Cette récolte de biomasse permettrait de répondre aux besoins multiples des populations (construction, énergie, etc.) tout en limitant l'utilisation de matériaux aux empreintes carbone plus importantes, c.-à-d., des matériaux non renouvelables. Si cette représentation du secteur forestier reste fondamentalement possible, mes travaux montrent qu'elle n'en reste pas moins incertaine à l'heure d'aujourd'hui. Elle occulte ainsi les subtilités propres aux écosystèmes vivants, au devenir des produits du bois et tire des conclusions parfois grossières sur l'impact réel du panier de produits et de la substitution qu'il peut entraîner sur les marchés.

Mes travaux suggèrent que pour la province du Québec, de l'échelle du peuplement à l'échelle de la province, les stratégies d'aménagement basées sur l'augmentation du volume de bois récolté n'apportent généralement pas de bénéfices climatiques, contrairement à celles qui visent à réduire le volume récolté par rapport à la stratégie de référence (Moreau et al.,

2023b, 2022, 2023a). En général, la perte de carbone dans les écosystèmes forestiers due à une augmentation des superficies récoltées, couplée à une augmentation des émissions de GES, engendrée par la dégradation des produits du bois dans les lieux d'enfouissement, notamment sous forme de méthane, n'est pas compensée par des effets de substitution bien trop faibles et incertains (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Ces conclusions s'appliquent autant à moyen (2050) (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a) qu'à long terme (2100) (Moreau et al., 2022), avec ou sans prise en compte de l'impact des changements climatiques (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Cette conclusion est d'ailleurs exacerbée lorsque les analyses ne sont plus faites en dioxyde de carbone équivalent, mais selon le forçage radiatif dynamique des émissions (Moreau et al., 2023a), donc avec une meilleure prise en compte de la temporalité des émissions de GES et de leur pouvoir réchauffant.

Une stratégie de réduction de la récolte n'est cependant pas exempte de toute incertitude. C'est notamment un risque important pris pour des stocks de carbone sensibles à l'augmentation des perturbations naturelles. De plus, les risques de fuite sont importants, et tout le bois non récolté dans la province sera selon toute vraisemblance compensé par une récolte accrue dans d'autres juridictions pour satisfaire la demande nationale et internationale en ressource. Ces fuites pourraient donc rendre caduc tout bénéfice climatique engendré dans la province.

Mes travaux de recherche suggèrent cependant que les deux grands types de stratégies d'aménagement forestier, augmentation et réduction du volume annuellement récolté, peuvent co-exister pour maximiser le potentiel d'atténuation du secteur forestier provincial (Moreau et al., 2023b, 2022). Tout d'abord, car certains peuplements forestiers pourraient bénéficier des perturbations pour redynamiser leur productivité. Cependant, ces derniers ne représentent sûrement qu'une proportion minoritaire des écosystèmes de la province (Moreau et al., 2023b, 2022, 2023a). Si la validation de cette hypothèse doit faire l'objet d'études supplémentaires, la nécessité de considérer les caractéristiques initiales des peuplements et l'impact d'une perturbation sur leurs dynamiques reste cependant primordiale. D'autre part, des circonstances existent pour justifier des bénéfices climatiques à une augmentation du volume de bois récolté (Moreau et al., 2023b). Les facteurs principaux sont une meilleure substitution moyenne et/ou une meilleure gestion des émissions, notamment de méthane, engendrées par la fin de vie des produits du bois. Une amélioration du potentiel d'atténuation des produits du bois est donc aussi un élément nécessaire à une coexistence des deux grands types d'aménagement à une échelle provinciale et nationale.

Il apparaît donc que ni une stratégie basée seulement sur la réduction et encore moins sur l'augmentation du volume de bois récolté ne soit une solution idéale pour le secteur forestier québécois. Il est cependant nécessaire, pour répondre à l'urgence climatique, de déployer les actions d'atténuation avec des synergies sectorielles et un potentiel de réalisation important qui ne seront dans aucun cas contreproductives dans le futur. Ce sont des étapes nécessaires pour permettre une prise de décision éclairée et le développement d'une stratégie sectorielle

efficace.

Il est néanmoins important de noter que l'ensemble des incertitudes établies dans cette discussion et conclusion générale (Tableau 1) devront faire l'objet de recherches afin d'en quantifier avec plus de force les impacts sur le potentiel d'atténuation du secteur forestier. Toute mise en application concrète d'action d'atténuation devra se faire de concert avec des mesures d'adaptation aux changements climatiques afin de garantir la viabilité de la stratégie sectorielle dans le temps.

Bibliographie

Bibliographie

- A. Ameray, Y. Bergeron, O. Valeria, M. Montoro Girona, and X. Cavard. Forest Carbon Management : a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 7(4) :245–266, December 2021. ISSN 2198-6436. doi : 10.1007/s40725-021-00151-w.
- P.A. Arias, N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld. Technical summary : Climate change 2021 : The physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Masson-Delmotte, V. and Zhai, P. and Pirani, A. and Connors, S.L. and Péan, C. and Berger, S. and Caud, N. and Chen, Y. and Goldfarb, L. and Gomis, M.I. and Huang, M. and Leitzell, K. and Lonnoy, E. and Matthews, J.B.R. and Maycock, T.K. and Waterfield, T. and Yelekçi, O. and Yu, R. and Zhou, B. (eds.)]. Technical report, IPCC, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- BAPE. L'état des lieux et la gestion des résidus ultimes. Technical Report 364, Bureau d'audiences publiques sur l'environnement, 2022.

- R. Beaugerard, P. Lavoie, E. Thiffault, I. Ménard, J-F. Moreau, L. and Boucher, and F. Robichaud. Groupe de travail sur la forêt et les changements climatiques (gtfcc). Technical report, GTFCC, 2019.
- G. Berndes, M. Goldmann, F. Johnsson, A. Lindroth, A. Wijkman, B. Abt, J. Bergh, A. Cowie, T. Kallioikoski, W. A. Kurz, S. Luysaert, and G.-J. Nabuurs. Manage for maximum wood production or leave the forest as a carbon sink? Technical report, KSLA, 2018. URL <http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=39466>. ISSN : 0023-5350.
- P. Bernier, R. Astrup, R. Bright, H. Genet, E. Hurmekoski, F. Kraxner, J. Liski, T. Lundmark, D. McGuire, J. Moen, A. K. Kurz, D. Schepaschenko, L. See, A. Shvidenko, E. Thiffault, and D. Tuomasjukka. HOW CAN THE CIRCUMBOREAL FOREST CONTRIBUTE TO MITIGATING CLIMATE CHANGE? Meeting report, IBFRA, Haparanda, 2018.
- B. Bond-Lamberty and A. Thomson. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288) :579–U132, 2010. ISSN 0028-0836. doi : 10.1038/nature08930. Place : London Publisher : Nature Publishing Group WOS :000275974200045.
- A. K. Bose, A. Weiskittel, C. Kuehne, R. G. Wagner, E. Turnblom, and H. E. Burkhart. Tree-level growth and survival following commercial thinning of four major softwood species in North America. *Forest Ecology and Management*, 427 :355–364, November 2018. ISSN 0378-1127. doi : 10.1016/j.foreco.2018.06.019.
- M. Bouchard, N. Aquilue, E. Filotas, J. Boucher, and M.-A. Parisien. Forecasting wildfire-induced declines in potential forest harvest levels across Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 2022. ISSN 0045-5067. doi : 10.1139/cjfr-2022-0186.
- D. Boucher, Y. Boulanger, I. Aubin, P. Y. Bernier, A. Beaudoin, L. Guindon, and S. Gauthier. Current and projected cumulative impacts of fire, drought, and insects on timber volumes across canada. *Ecological Applications*, 28(5) :1245–1259, 2018. ISSN 1939-5582. doi : 10.1002/eap.1724.
- Y. Boulanger and Jesus Pascual Puigdevall. Boreal forests will be more severely affected by projected anthropogenic climate forcing than mixedwood and northern hardwood forests in eastern canada. *Landscape Ecology*, 36(6) :1725–1740, 2021. ISSN 1572-9761. doi : 10.1007/s10980-021-01241-7.
- Y. Boulanger, A. R. Taylor, D. T. Price, D. Cyr, E. McGarrigle, W. Rammer, G. Sainte-Marie, A. Beaudoin, L. Guindon, and N. Mansuy. Climate change impacts on forest landscapes along the canadian southern boreal forest transition zone. *Landscape Ecology*, 32(7) :1415–1431, 2017. ISSN 0921-2973, 1572-9761. doi : 10.1007/s10980-016-0421-7.
- M. Brandão, A. Lavoie, M. U. F. Kirschbaum, B. P. Weidema, A. L. Cowie, S. V. Jørgensen, M. Z. Hauschild, D. W. Pennington, and K. Chomkhamtri. Key issues and options in

- accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment and carbon footprinting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1) :230–240, January 2013. ISSN 1614-7502. doi : 10.1007/s11367-012-0451-6.
- M. Braun, G. Winner, P. Schwarzbauer, and T. Stern. Apparent Half-Life-Dynamics of Harvested Wood Products (HWPs) in Austria : Development and analysis of weighted time-series for 2002 to 2011. *Forest Policy and Economics*, 63 :28–34, February 2016. ISSN 1389-9341. doi : 10.1016/j.forpol.2015.11.008. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138993411530071X>.
- A. F.J. Brecka, Y. Boulanger, E. B. Searle, A. R. Taylor, D. T. Price, Y. Zhu, C. Shahi, and H. Y.H. Chen. Sustainability of Canada’s forestry sector may be compromised by impending climate change. *Forest Ecology and Management*, 474 :118352, 2020. ISSN 03781127. doi : 10.1016/j.foreco.2020.118352.
- C. Breton, P. Blanchet, B. Amor, R. Beaugard, and W.-S. Chang. Assessing the Climate Change Impacts of Biogenic Carbon in Buildings : A Critical Review of Two Main Dynamic Approaches. *Sustainability*, 10(6) :2020, June 2018. ISSN 2071-1050. doi : 10.3390/su10062020. Number : 6 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- M-H. Brice, K. Cazelles, P. Legendre, and M-J. Fortin. Disturbances amplify tree community responses to climate change in the temperate–boreal ecotone. *Global Ecology and Biogeography*, 28(11) :1668–1681, 2019. ISSN 1466-8238. doi : 10.1111/geb.12971.
- P. Brunet-Navarro, H. Jochheim, F. Kroiher, and B. Muys. Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors. *Journal of Cleaner Production*, 170 :137–146, 2018. ISSN 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2017.09.135.
- P. Brunet-Navarro, H. Jochheim, G. Cardellini, K. Richter, and B. Muys. Climate mitigation by energy and material substitution of wood products has an expiry date. *Journal of Cleaner Production*, 303 :127026, 2021. ISSN 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2021.127026.
- Bureau de mise en marché des bois. Guide d’analyse économique appliquée aux investissements sylvicoles. *Québec*, 1, 2018.
- S. Bédard and Z. Majcen. Growth following single-tree selection cutting in Québec northern hardwoods. *The Forestry Chronicle*, 79(5) :898–905, 2003. ISSN 0015-7546, 1499-9315. doi : 10.5558/tfc79898-5.
- J. Chen, S. J. Colombo, M. T. Ter-Mikaelian, and L. S. Heath. Carbon Profile of the Managed Forest Sector in Canada in the 20th Century : Sink or Source? *Environmental Science & Technology*, 48(16) :9859–9866, 2014. ISSN 0013-936X. doi : 10.1021/es5005957. Publisher : American Chemical Society.

- J. Chen, M. T. Ter-Mikaelian, P. Q. Ng, and S. J. Colombo. Ontario's managed forests and harvested wood products contribute to greenhouse gas mitigation from 2020 to 2100. *The Forestry Chronicle*, 94(03) :269–282, 2018a. ISSN 0015-7546. doi : 10.5558/tfc2018-040. Publisher : Canadian Institute of Forestry.
- J. Chen, M. T Ter-Mikaelian, H. Yang, and S. J. Colombo. Assessing the greenhouse gas effects of harvested wood products manufactured from managed forests in canada. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 91(2) :193–205, 2018b. ISSN 0015-752X, 1464-3626. doi : 10.1093/forestry/cpx056.
- F. Cherubini, G. Guest, and A. H. Strømman. Application of probability distributions to the modeling of biogenic CO₂ fluxes in life cycle assessment. *GCB Bioenergy*, 4(6) : 784–798, 2012. ISSN 1757-1707. doi : 10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x>. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1757-1707.2011.01156.x>.
- F. Cordier, S. and Robichaud, P. Blanchet, and B. Amor. Regional environmental life cycle consequences of material substitutions : The case of increasing wood structures for non-residential buildings. *Journal of Cleaner Production*, 328 :129671, 2021. ISSN 0959-6526. doi : 10.1016/j.jclepro.2021.129671.
- J.-F. Côté, J. E. Luther, P. Lenz, R. A. Fournier, and O. R. van Lier. Assessing the impact of fine-scale structure on predicting wood fibre attributes of boreal conifer trees and forest plots. *Forest Ecology and Management*, 479 :118624, January 2021. ISSN 0378-1127. doi : 10.1016/j.foreco.2020.118624. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112720313931>.
- A. J. Dugan, R. Birdsey, V. S. Mascorro, M. Magnan, C. E. Smyth, M. Olguin, and W. A. Kurz. A systems approach to assess climate change mitigation options in landscapes of the united states forest sector. *Carbon Balance and Management*, 13(1) :13, 2018. ISSN 1750-0680. doi : 10.1186/s13021-018-0100-x.
- C. Durocher, E. Thiffault, A. Achim, D. Auty, and J. Barrette. Untapped volume of surplus forest growth as feedstock for bioenergy. *Biomass and Bioenergy*, 120 :376–386, 2019. ISSN 0961-9534. doi : 10.1016/j.biombioe.2018.11.024.
- L. D'Orangeville, D. Houle, L. Duchesne, R. P. Phillips, Y. Bergeron, and D. Kneeshaw. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications*, 9(1) :3213, August 2018. ISSN 2041-1723. doi : 10.1038/s41467-018-05705-4. URL <https://www.nature.com/articles/s41467-018-05705-4>. Number : 1 Publisher : Nature Publishing Group.
- Environment and Climate Change Canada. National inventory 1990-2019 : Greenhouse gas sources and sinks in canada - part 2, 2021.

- Environment and Climate Change Canada. Federal Offset Protocol : Landfill Methane Recovery and Destruction. Version 1 June 2022. Offset protocol, Environment and Climate Change Canada, 2022a.
- Environment and Climate Change Canada. Reducing methane emissions from Canada’s municipal solid waste landfills. Technical report, Environment and Climate Change Canada, 2022b.
- FAO. FOREST PRODUCTS IN THE GLOBAL BIOECONOMY Enabling substitution by wood-based products and contributing to the Sustainable Development Goals. Technical report, FAO, 2022. URL <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb7274en>.
- Statistics Finland. GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN FINLAND 1990-2008 : National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Technical report, Statistics Finland, 2010.
- M. D. Flannigan, B. M. Wotton, G. A. Marshall, W. J. de Groot, J. Johnston, N. Jurko, and A. S. Cantin. Fuel moisture sensitivity to temperature and precipitation : climate change implications. *Climatic Change*, 134(1) :59–71, January 2016. ISSN 1573-1480. doi : 10.1007/s10584-015-1521-0. URL <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1521-0>.
- P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Raga, M. Schulz, R. Van Dorland, G. Bodeker, D. Etheridge, P. Foukal, P. Fraser, M. Geller, F. Joos, C. D. Keeling, R. Keeling, S. Kinne, K. Lassey, D. Oram, K. O’Shaughnessy, N. Ramankutty, G. Reid, D. Rind, K. Rosenlof, R. Sausen, D. Schwarzkopf, S. K. Solanki, G. Stenchikov, N. Stuber, T. Takemura, C. Textor, R. Wang, R. Weiss, T. Whorf, T. Nakajima, V. Ramanathan, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. V. Dorland. 2007 : Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In : *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, page 106, 2007.
- P. Friedlingstein, M. O’Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, L. Gregor, J. Hauck, C. Le Quéré, I. T. Lujikx, A. Olsen, G. P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, C. Schwingshackl, S. Sitch, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. R. Alin, R. Alkama, A. Arneeth, V. K. Arora, N. R. Bates, M. Becker, N. Bellouin, H. C. Bittig, L. Bopp, F. Chevallier, L. P. Chini, M. Cronin, W. Evans, S. Falk, R. A. Feely, T. Gasser, M. Gehlen, T. Gkritzalis, L. Gloege, G. Grassi, N. Gruber, Ö. Gürses, I. Harris, M. Hefner, R. A. Houghton, G. C. Hurtt, Y. Iida, T. Ilyina, A. K. Jain, A. Jersild, K. Kadono, E. Kato, D. Kennedy, K. Klein Goldewijk,

- J. Knauer, J. I. Korsbakken, P. Landschützer, N. Lefèvre, K. Lindsay, J. Liu, Z. Liu, G. Marland, N. Mayot, M. J. McGrath, N. Metzl, N. M. Monacci, D. R. Munro, S.-I. Nakaoka, Y. Niwa, K. O'Brien, T. Ono, P. I. Palmer, N. Pan, D. Pierrot, K. Pocock, B. Poulter, L. Rensplandy, E. Robertson, C. Rödenbeck, C. Rodriguez, T. M. Rosan, J. Schwinger, R. Séférian, J. D. Shutler, I. Skjelvan, T. Steinhoff, Q. Sun, A. J. Sutton, C. Sweeney, S. Takao, T. Tanhua, P. P. Tans, X. Tian, H. Tian, B. Tilbrook, H. Tsujino, F. Tubiello, G. R. van der Werf, A. P. Walker, R. Wanninkhof, C. Whitehead, A. Willstrand Wranne, R. Wright, W. Yuan, C. Yue, X. Yue, S. Zaehle, J. Zeng, and B. Zheng. Global carbon budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11) :4811–4900, 2022. doi : 10.5194/essd-14-4811-2022. URL <https://essd.copernicus.org/articles/14/4811/2022/>.
- J. Gan and B. A. McCarl. Measuring transnational leakage of forest conservation. *Ecological Economics*, 64(2) :423–432, December 2007. ISSN 0921-8009. doi : 10.1016/j.ecolecon.2007.02.032. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907001668>.
- B. Gao, A. R. Taylor, E. B. Searle, P. Kumar, Z. Ma, A. M. Hume, and H. Y. H. Chen. Carbon Storage Declines in Old Boreal Forests Irrespective of Succession Pathway. *Ecosystems*, 21(6) :1168–1182, 2018. ISSN 1432-9840, 1435-0629. doi : 10.1007/s10021-017-0210-4.
- M.-M. Gauthier, M. Barrette, and S. Tremblay. Commercial Thinning to Meet Wood Production Objectives and Develop Structural Heterogeneity : A Case Study in the Spruce-Fir Forest, Quebec, Canada. *Forests*, 6(2) :510–532, February 2015a. ISSN 1999-4907. doi : 10.3390/f6020510. URL <https://www.mdpi.com/1999-4907/6/2/510>. Number : 2 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- S. Gauthier, P. Bernier, T. Kuuluvainen, A. Z. Shvidenko, and D. G. Schepaschenko. Boreal forest health and global change. *Science*, 349(6250) :819–822, 2015b. ISSN 0036-8075, 1095-9203. doi : 10.1126/science.aaa9092. American Association for the Advancement of Science Section : Review.
- M. P. Girardin, O. Bouriaud, E. H. Hogg, W. Kurz, N. E. Zimmermann, J. M. Metsaranta, R. de Jong, D. C. Frank, J. Esper, U. Büntgen, X. Jing Guo, and J. Bhatti. No growth stimulation of Canada's boreal forest under half-century of combined warming and CO2 fertilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(52) :E8406–E8414, December 2016. doi : 10.1073/pnas.1610156113. URL <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1610156113>. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.
- D. Goldblum and L. Rigg. The deciduous forest – boreal forest ecotone. *Geography Compass*, 4 :701–717, 2010. doi : 10.1111/j.1749-8198.2010.00342.x.

- Gouvernement du Québec. Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier a-18.1. Technical report, Gouvernement du Québec, 2013. URL <http://legisQuebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/a-18.1>.
- Gouvernement du Québec. chapter q-2, r.19 regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials - environment quality act. quebec. Technical report, Gouvernement du Québec, 2021.
- G. Grassi, J. House, . Dentener, S. Federici, M. den Elzen, and J. Penman. The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, 7(3) :220–226, 2017. ISSN 1758-6798. doi : 10.1038/nclimate3227.
- P. Gundersen, E. E. Thybring, T. Nord-Larsen, L. Vesterdal, K. J. Nadelhoffer, and V. K. Johannsen. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 591(7851) :E21–E23, March 2021. ISSN 1476-4687. doi : 10.1038/s41586-021-03266-z.
- L. Gustavsson, R. Sathre, P. Leskinen, and Florian Nabuurs, G.-J.and Kraxner. Comment on ‘Climate mitigation forestry—temporal trade-offs’. *Environmental Research Letters*, 17(4) :048001, March 2022. ISSN 1748-9326. doi : 10.1088/1748-9326/ac57e3. URL <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac57e3>. Publisher : IOP Publishing.
- A. Harel, E. Thiffault, and D. Paré. Ageing forests and carbon storage : a case study in boreal balsam fir stands. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 94(5) :651–663, 2021. ISSN 0015-752X. doi : 10.1093/forestry/cpab021.
- M. E Harmon. Have product substitution carbon benefits been overestimated? A sensitivity analysis of key assumptions. *Environmental Research Letters*, 14(6) :065008, 2019. ISSN 1748-9326. doi : 10.1088/1748-9326/ab1e95.
- M. Hasegawa, A. Karlberg, M. Hertzberg, and P.J. Verkerk. Innovative forest products in the circular bioeconomy. *Open Res Europe*, 2022. doi : doi.org/10.12688/openreseurope.14413.2. URL <https://open-research-europe.ec.europa.eu/articles/2-19/v2>.
- C. R. Hennigar and D. A. MacLean. Spruce budworm and management effects on forest and wood product carbon for an intensively managed forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010. doi : 10.1139/X10-104.
- Anouschka R. Hof, Johanna Lundström, and M. J. Duveneck. Modeling the Impacts of Climate Change on Ecosystem Services in Boreal Forests. In M. Montoro Girona, H. Morin, S. Gauthier, and Y. Bergeron, editors, *Boreal Forests in the Face of Climate Change : Sustainable Management*, Advances in Global Change Research, pages 613–636. Springer International Publishing, Cham, 2023. ISBN 978-3-031-15988-6. doi : 10.1007/978-3-031-15988-6_25. URL https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_25.

- D. J. Houndode, C. Krause, and H. Morin. Predicting balsam fir mortality in boreal stands affected by spruce budworm. *Forest Ecology and Management*, 496 :119408, September 2021. ISSN 0378-1127. doi : 10.1016/j.foreco.2021.119408.
- C. Howard, C. C. Dymond, V.C. Griess, D. Tolkien-Spurr, and G. C. van Kooten. Wood product carbon substitution benefits : a critical review of assumptions. *Carbon Balance and Management*, 16(1) :9, 2021. ISSN 1750-0680. doi : 10.1186/s13021-021-00171-w.
- X. Hu, G. Shi, and D. G. Hodges. International Market Leakage from China’s Forestry Policies. *Forests*, 5(11) :2613–2625, November 2014. ISSN 1999-4907. doi : 10.3390/f5112613. URL <https://www.mdpi.com/1999-4907/5/11/2613>. Number : 11 Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- E. Hurmekoski, R. Jonsson, J. Korhonen, J. Jänis, M. Mäkinen, P. Leskinen, and L. Hetemäki. Diversification of the forest industries : role of new wood-based products. *Canadian Journal of Forest Research*, 48(12) :1417–1432, 2018. ISSN 0045-5067. doi : 10.1139/cjfr-2018-0116.
- E. Hurmekoski, T. Myllyviita, J. Seppälä, T. Heinonen, A. Kilpeläinen, T. Pukkala, T. Mattila, L. Hetemäki, A. Asikainen, and H. Peltola. Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 24(4) :899–912, 2020. ISSN 1530-9290. doi : 10.1111/jiec.12981.
- E. Hurmekoski, C. E. Smyth, T. Stern, P. J. Verkerk, and R. Asada. Substitution impacts of wood use at the market level : a systematic review. *Environmental Research Letters*, 16 (12) :123004, November 2021. ISSN 1748-9326. doi : 10.1088/1748-9326/ac386f. Publisher : IOP Publishing.
- E. Hurmekoski, J. Suuronen, L. Ahlvik, J. Kunttu, and T. Myllyviita. Substitution impacts of wood-based textile fibers : Influence of market assumptions. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4) :1564–1577, 2022. ISSN 1530-9290. doi : 10.1111/jiec.13297. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.13297>. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/jiec.13297>.
- E. Hurmekoski, J. Kunttu, T. Heinonen, T. Pukkala, and H. Peltola. Does expanding wood use in construction and textile markets contribute to climate change mitigation? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 174 :113152, March 2023. ISSN 1364-0321. doi : 10.1016/j.rser.2023.113152. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123000084>.
- A. Maarit I. Kallio and Birger S. Leakage of forest harvest changes in a small open economy : case Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 33(5) :502–510, July 2018. ISSN 0282-7581. doi : 10.1080/02827581.2018.1427787. URL <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1427787>. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1427787>.

- C.-M. Iordan, X. Hu, A. Arvesen, P. Kauppi, and F. Cherubini. Contribution of forest wood products to negative emissions : historical comparative analysis from 1960 to 2015 in Norway, Sweden and Finland. *Carbon Balance and Management*, 13(1) :1–16, December 2018. ISSN 1750-0680. doi : 10.1186/s13021-018-0101-9. URL <https://cbmjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-018-0101-9>. Number : 1 Publisher : BioMed Central.
- IPCC. 2013 revised supplementary methods and good practice guidance arising from the kyoto protocol. Technical report, IPCC, 2014. OCLC : 876721569.
- Ippc. Summary for Policymakers. In : Global Warming of 1.5°C : IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Summary for Policymakers, Cambridge University Press, NY, 2018. URL <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009157940/type/book>.
- IPCC. *Annex VII : Glossary* [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)], page 2215–2256. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. doi : 10.1017/9781009157896.022.
- T. Kalliokoski, J. Bäck, M. Boy, M. Kulmala, N. Kuusinen, A. Mäkelä, K. Minkkinen, F. Minunno, P. Paasonen, M. Peltoniemi, D. Taipale, L. Valsta, A. Vanhatalo, L. Zhou, P. Zhou, and F. Berninger. Mitigation Impact of Different Harvest Scenarios of Finnish Forests That Account for Albedo, Aerosols, and Trade-Offs of Carbon Sequestration and Avoided Emissions. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 2020. ISSN 2624-893X.
- S. Kellomäki, H. Väisänen, M. U F Kirschbaum, S. Kirsikka-Aho, and H. Peltola. Effects of different management options of Norway spruce on radiative forcing through changes in carbon stocks and albedo. *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 94(4) : 588–597, 2021. ISSN 0015-752X. doi : 10.1093/forestry/cpab010.
- L. S. Kenefic, M. Bataineh, J. S. Wilson, J. C. Brissette, and R. D. Nyland. Silvicultural rehabilitation of cutover mixedwood stands. *Journal of Forestry*, 112(3) :261–271, 2014. ISSN 0022-1201. doi : 10.5849/jof.13-033.
- M. P. Krishna and M. Mohan. Litter decomposition in forest ecosystems : a review. *Energy, Ecology and Environment*, 2(4) :236–249, 2017. ISSN 2363-8338. doi : 10.1007/s40974-017-0064-9.

- W.A. Kurz, C.H. Shaw, C. Boisvenue, G. Stinson, J. Metsaranta, D. Leckie, A. Dyk, C. Smyth, and E.T. Neilson. Carbon in Canada's boreal forest — a synthesis. *Environmental Reviews*, 21(4) :260–292, 2013. ISSN 1181-8700, 1208-6053. doi : 10.1139/er-2013-0041.
- T. Kuuluvainen and S. Gauthier. Young and old forest in the boreal : critical stages of ecosystem dynamics and management under global change. *Forest Ecosystems*, 5(1) :26, June 2018. ISSN 2197-5620. doi : 10.1186/s40663-018-0142-2. URL <https://doi.org/10.1186/s40663-018-0142-2>.
- P. Leskinen, G. Cardellini, S. González-García, E. Hurmekoski, R. Sathre, J. Seppälä, C. Smyth, T. Stern, P. J. Verkerk, and European Forest Institute. Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy, European Forest Institute, 2018.
- E. Lessard, R. A. Fournier, J. E. Luther, M. J. Mazerolle, and O. R. van Lier. Modeling wood fiber attributes using forest inventory and environmental data for Newfoundland's boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 313 :307–318, February 2014. ISSN 0378-1127. doi : 10.1016/j.foreco.2013.10.030. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112713007172>.
- A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, and R. Samson. Considering time in LCA : Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental Science & Technology*, 44(8) :3169–3174, 2010. ISSN 0013-936X, 1520-5851. doi : 10.1021/es9030003.
- D. MacLean, K. Porter, D. Quiring, and C. Hennigar. Optimized harvest planning under alternative foliage-protection scenarios to reduce volume losses to spruce budworm. *Canadian Journal of Forest Research*, 37 :1755–1769, 2007. doi : 10.1139/X07-001.
- E. S. Marland, K. Stellar, and G. H. Marland. A distributed approach to accounting for carbon in wood products. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(1) : 71–91, January 2010. ISSN 1573-1596. doi : 10.1007/s11027-009-9205-6. URL <https://doi.org/10.1007/s11027-009-9205-6>.
- MELCC. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles : PLAN D'ACTION 2019-2024. Technical report, MELCC, Québec, 2019. URL <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-action-2019-2024-pqgmr.pdf>.
- MELCC. Stratégie de valorisation de la matière organique. Technical report, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Québec, 2020. URL <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/organique/strategie-valorisation-matiere-organique.pdf>.

- MELCCFP and MAPAQ. GES 1990-2020. Méthodologie de calcul d'émissions, description des secteurs et facteurs d'émission. Annexes à l'inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2020 et leur évolution depuis 1990. Annexes techniques, Direction des communications du MELCCFP, Québec (QC), 2022.
- C. Messier, J. Bauhus, F. Doyon, F. Maure, R. Sousa-Silva, P. Nolet, M. Mina, N. Aquilué, M.-J. Fortin, and K. Puettmann. The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems*, 6(1) :21, 2019. ISSN 2197-5620. doi : 10.1186/s40663-019-0166-2.
- MFFP. Norme de stratification écoforestière. Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Technical report, MFFP, 2008.
- MFFP. Stratégie nationale de production de bois. Technical report, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, 2020.
- MFFP. Plan de mise en Œuvre 2021-2026 de la Politique d'intégration du bois dans la construction. Technical Report F33-02-2110, Ministère des forêts de la faune et des parcs, Québec, 2021a.
- MFFP. RESSOURCES ET INDUSTRIES FORESTIÈRES DU QUÉBEC Portrait statistique 2020. Technical Report 26, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Québec, 2021b.
- MFFP. Plan d'action sur la mobilisation des propriétaires forestiers à la récolte de bois 2022-2025. Technical report, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la gestion de l'approvisionnement en bois, Québec, 2022.
- M. Mina, C. Messier, M. Duveneck, M.-J. Fortin, and N. Aquilué. Network analysis can guide resilience-based management in forest landscapes under global change. *Ecological Applications*, 31(1) :e2221, 2021. ISSN 1939-5582. doi : <https://doi.org/10.1002/eap.2221>.
- M. Montoro Girona, T. Aakala, N. Aquilué, A.-C. Bélisle, E. Chaste, V. Danneyrolles, O. Díaz-Yáñez, L. D'Orangeville, G. Grosbois, A. Hester, S. Kim, N. Kulha, M. Martin, L. Mousaoui, C. Pappas, J. Portier, S. Teitelbaum, J.-P. Tremblay, J. Svensson, M. Versluijs, M. Wallgren, J. Wang, and S. Gauthier. Challenges for the Sustainable Management of the Boreal Forest Under Climate Change. In M. Montoro Girona, H. Morin, S. Gauthier, and Y. Bergeron, editors, *Boreal Forests in the Face of Climate Change : Sustainable Management*, Advances in Global Change Research, pages 773–837. Springer International Publishing, Cham, 2023. ISBN 978-3-031-15988-6. doi : 10.1007/978-3-031-15988-6_31. URL https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_31.
- L. Moreau, E. Thiffault, D. Cyr, Y. Boulanger, and R. Beauregard. How can the forest sector mitigate climate change in a changing climate? Case studies of boreal and northern

- temperate forests in eastern Canada. *Forest Ecosystems*, 9 :100026, 2022. ISSN 2197-5620. doi : 10.1016/j.fecs.2022.100026.
- L. Moreau, E. Thiffault, and R. Beaugard. Assessing the Effects of Different Harvesting Practices on the Forestry Sector’s Climate Benefits Potential : A Stand Level Theoretical Study in an Eastern Canadian Boreal Forest. *Forests*, 14(6) :1109, June 2023a. ISSN 1999-4907. doi : 10.3390/f14061109.
- L. Moreau, E. Thiffault, W. A. Kurz, and R. Beaugard. Under what circumstances can the forest sector contribute to 2050 climate change mitigation targets? A study from forest ecosystems to landfill methane emissions for the province of Quebec, Canada. *GCB Bioenergy*, n/a(n/a), 2023b. ISSN 1757-1707. doi : 10.1111/gcbb.13081.
- I. Ménard, E. Thiffault, Y. Boulanger, and J-F. Boucher. Multi-model approach to integrate climate change impact on carbon sequestration potential of afforestation scenarios in Quebec, Canada. *Ecological Modelling*, 473 :110144, November 2022a. ISSN 0304-3800. doi : 10.1016/j.ecolmodel.2022.110144. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380022002459>.
- I. Ménard, E. Thiffault, W. A. Kurz, and J-F. Boucher. Carbon sequestration and emission mitigation potential of afforestation and reforestation of unproductive territories. *New Forests*, December 2022b. ISSN 1573-5095. doi : 10.1007/s11056-022-09955-5.
- A. A. Nabuurs, G.-J. and Hatab, M. Bustamante, H. Clark, P. Havlík, K. N. Ninan, A. Popp, S. Roe, L. Aoki, D. Angers, N. H. Ravindranath, F. Ayala-Niño, and J. P. Emmet-Booth. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU). In IPCC, 2022 : Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 2022. doi : 10.1017/9781009157926.009.
- G. J. Nabuurs, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, J. Ford-Robertson, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, F. Achard, C. Anaya, S. Brinkman, N. Higuchi, M. Hoogwijk, F. Lecocq, S. Rose, B. Schlamadinger, B. S. S. Filho, B. Sohngen, B. Strengers, M. Apps, and E. Calvo. 2007 : Forestry. In Climate Change 2007 : Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, page 44, 2007.

- P. Nepal, P. J. Ince, K. E. Skog, and S. J. Chang. Forest carbon benefits, costs and leakage effects of carbon reserve scenarios in the United States. *Journal of Forest Economics*, Volume 19, 2013; pp. 286-306., 19 :286–306, 2013. doi : 10.1016/j.jfe.2013.06.001. URL <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/44268>.
- L. Paradis, E. Thiffault, and A. Achim. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of quebec (canada). *Forestry : An International Journal of Forest Research*, 92(3) :264–277, 2019. ISSN 0015-752X, 1464-3626. doi : 10.1093/forestry/cpz004.
- J. Parobek, H. Paluš, M. Moravčík, M. Kovalčík, M. Dzian, V. Murgaš, and S. Šimo Svrček. Changes in Carbon Balance of Harvested Wood Products Resulting from Different Wood Utilization Scenarios. *Forests*, 10(7) :590, July 2019. ISSN 1999-4907. doi : 10.3390/f10070590. URL <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/7/590>.
- M. Peichl, E. Martínez-García, J. E. S. Fransson, J. Wallerman, H. Laudon, T. Lundmark, and M. B. Nilsson. Landscape-variability of the carbon balance across managed boreal forests. *Global Change Biology*, 29(4) :1119–1132, 2023. ISSN 1365-2486. doi : 10.1111/gcb.16534. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.16534>.
- C. Peng, Z. Ma, X. Lei, Q. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang, and X. Zhou. A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada’s boreal forests. *Nature Climate Change*, 1(9) :467–471, December 2011. ISSN 1758-6798. doi : 10.1038/nclimate1293. URL <https://www.nature.com/articles/nclimate1293>. Number : 9 Publisher : Nature Publishing Group.
- Y. Peng, S. Thomas, and D. Tian. Forest management and soil respiration : Implications for carbon sequestration. *Environmental Reviews*, 16 :93–111, 2008. doi : 10.1139/A08-003.
- H. Petersson, D. Ellison, A. Appiah Mensah, G. Berndes, G. Egnell, M. Lundblad, T. Lundmark, A. Lundström, J. Stendahl, and P.-E. Wikberg. On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden. *GCB Bioenergy*, n/a(n/a), 2022. ISSN 1757-1707. doi : 10.1111/gcbb.12943.
- M. Prévost and L. Charette. Rehabilitation silviculture in a high-graded temperate mixed-wood stand in quebec, canada. *New Forests*, 50(4) :677–698, 2019. ISSN 1573-5095. doi : 10.1007/s11056-018-9690-0.
- T. A. M. Pugh, M. Lindeskog, B. Smith, B. Poulter, A. Arneth, V. Haverd, and L. Calle. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(10) :4382–4387, March 2019. doi : 10.1073/pnas.1810512116. URL <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1810512116>. Publisher : Proceedings of the National Academy of Sciences.

- T. Pukkala. Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *Forest Policy and Economics*, 43 :41–50, 2014. ISSN 13899341. doi : 10.1016/j.forpol.2014.03.004.
- S. Rüter, R.W. Matthews, M. Lundblad, A. Sato, and R.H. Hassan. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, vol. 4, chapter 12 : Harvested wood products. Technical report, IPCC, 2019.
- R. Sathre and J. O'Connor. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2) :104–114, 2010. ISSN 14629011. doi : 10.1016/j.envsci.2009.12.005.
- J-P. Saucier, J-F. Bergeron, P. Grondin, and A. Robitaille. Les régions écologiques du québec méridional : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des ressources naturelles. *MNRQ*, Supplément :1–12, 02 1998.
- R. Seidl, D. Thom, M. Kautz, Da. Martin-Benito, M. Peltoniemi, G. Vacchiano, D.e Wild, J.and Ascoli, M. Petr, J. Honkaniemi, M. J. Lexer, V. Trotsiuk, P. Mairota, M. Svoboda, M. Fabrika, T. A. Nagel, and Christopher P. O. Reyer. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7(6) :395–402, 2017. ISSN 1758-6798. doi : 10.1038/nclimate3303.
- F. Senez-Gagnon, E. Thiffault, D. Paré, A. Achim, and Y. Bergeron. Dynamics of detrital carbon pools following harvesting of a humid eastern Canadian balsam fir boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 430 :33–42, 2018. doi : 10.1016/j.foreco.2018.07.044.
- J. Seppälä, T. Heinonen, T. Pukkala, A. Kilpeläinen, T. Mattila, T. Myllyviita, A. Asikainen, and H. Peltola. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management*, 247 :580–587, 2019. ISSN 03014797. doi : 10.1016/j.jenvman.2019.06.031.
- T. Sharma, W. A. Kurz, G. Stinson, Marlow G. Pellatt, and Q. Li. A 100-year conservation experiment : Impacts on forest carbon stocks and fluxes. *Forest Ecology and Management*, 310 :242–255, 2013. ISSN 03781127. doi : 10.1016/j.foreco.2013.06.048.
- K. E. Skog. Sequestration of carbon in harvested wood products for the united states. *Forest products journal*. Vol. 58, no. 6 (June 2008) : Pages 56-72, 2008.
- P. Smith, M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E.A. Elsiddig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N.H. Ravindranath, C.W. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, and F. Tubiello. Climate change 2014

- mitigation of climate change : Working group III contribution to the fifth assessment technical report of the intergovernmental panel on climate change. Technical report, Cambridge University Press, 2014.
- C. E. Smyth, G. Stinson, E. Neilson, T. C. Lemprière, M. Hafer, G. J. Rampley, and W. A. Kurz. Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences*, 11(13) :3515–3529, 2014. ISSN 1726-4189. doi : 10.5194/bg-11-3515-2014.
- C. E. Smyth, Z. Xu, T. C. Lemprière, and W. A. Kurz. Climate change mitigation in British Columbia's forest sector : GHG reductions, costs, and environmental impacts. *Carbon Balance and Management*, 15(1) :1–22, 2020. ISSN 1750-0680. doi : 10.1186/s13021-020-00155-2.
- S. Soimakallio, H. Böttcher, J. Niemi, F. Mosley, S. Turunen, K. J. Hennenberg, J. Reise, and H. Fehrenbach. Closing an open balance : The impact of increased tree harvest on forest carbon. *GCB Bioenergy*, 14(8) :989–1000, 2022. ISSN 1757-1707. doi : 10.1111/gcbb.12981.
- J. W. N. Steenberg, P. N. Duinker, and P. G. Bush. Modelling the effects of climate change and timber harvest on the forests of central nova scotia, Canada. *Annals of Forest Science*, 70(1) :61–73, 2013. ISSN 1286-4560, 1297-966X. doi : 10.1007/s13595-012-0235-y.
- M. Thibault, E. Thiffault, Y. Bergeron, R. Ouimet, and S. Tremblay. Afforestation of abandoned agricultural lands for carbon sequestration : how does it compare with natural succession? *Plant and Soil*, 475(1) :605–621, June 2022. ISSN 1573-5036. doi : 10.1007/s11104-022-05396-3. URL <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05396-3>.
- H. C. Thorpe, S. C. Thomas, and J. P. Caspersen. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce (*Picea mariana*) boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(9) :1563–1571, September 2007. ISSN 0045-5067. doi : 10.1139/X07-148. URL <http://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/X07-148>. Publisher : NRC Research Press.
- H. Vihemäki, A. Ludvig, R. Toivonen, A. Toppinen, and G. Weiss. Institutional and policy frameworks shaping the wooden multi-storey construction markets : a comparative case study on Austria and Finland. *Wood Material Science & Engineering*, 14(5) :312–324, September 2019. ISSN 1748-0272. doi : 10.1080/17480272.2019.1641741. URL <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1641741>. Publisher : Taylor & Francis _eprint : <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1641741>.
- S. H. Xie, W. A. Kurz, and P. N. McFarlane. Inward- versus outward-focused bioeconomy strategies for British Columbia's forest products industry : a harvested wood products carbon storage and emission perspective. *Carbon Balance and Management*, 16(1) :1–22, December 2021. ISSN 1750-0680. doi : 10.1186/s13021-021-00193-4.

- S. H. Xie, W. A. Kurz, and P. N. McFarlane. Substitution benefits of British Columbia's mitigation strategies in the bioeconomy. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 28(3) :18, March 2023. ISSN 1573-1596. doi : 10.1007/s11027-023-10055-8. URL <https://doi.org/10.1007/s11027-023-10055-8>.
- Z. Xu, C. E. Smyth, T. C. Lemprière, G. J. Rampley, and W. W. A. Kurz. Climate change mitigation strategies in the forest sector : biophysical impacts and economic implications in british columbia, canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23 (2) :257–290, 2018. ISSN 1381-2386, 1573-1596. doi : 10.1007/s11027-016-9735-7.
- X. Zhang, J. Chen, A. C. Dias, and H. Yang. Improving Carbon Stock Estimates for In-Use Harvested Wood Products by Linking Production and Consumption—A Global Case Study. *Environmental Science & Technology*, 54(5) :2565–2574, March 2020. ISSN 0013-936X. doi : 10.1021/acs.est.9b05721. URL <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05721>. Publisher : American Chemical Society.
- A. Zubizarreta-Gerendiain, T. Pukkala, and H. Peltola. Effects of wood harvesting and utilisation policies on the carbon balance of forestry under changing climate : a finnish case study. *Forest Policy and Economics*, 62 :168–176, 2016.