



Émissions manquantes :

Lacunes en matière
de comptabilisation
du carbone dans
l'environnement bâti

RAPPORT DE L'IISD



© 2019 International Institute for Sustainable Development
Publié par l'International Institute for Sustainable Development

International Institute for Sustainable Development

L'International Institute for Sustainable Development (IISD) est un groupe de réflexion indépendant qui prône des solutions durables aux problèmes du XXI^e siècle. Notre mission vise à promouvoir le développement humain et la viabilité environnementale. Pour ce faire, nous développons des produits de recherche, d'analyse et de connaissances qui soutiennent l'élaboration de politiques judicieuses. Notre vision d'ensemble nous permet de nous attaquer aux causes profondes de certains des plus grands défis auxquels notre planète est aujourd'hui confrontée : la destruction de l'environnement, l'exclusion sociale, des lois et règles économiques injustes et un climat en mutation. L'effectif de l'IISD, composé de plus de 120 employés, 50 associés et 100 consultants, vient du monde entier et de nombreuses disciplines. Notre travail affecte des vies dans près de 100 pays. À la fois scientifique et stratégique, l'IISD fournit les connaissances nécessaires pour aller de l'avant.

L'IISD est enregistré comme organisme de bienfaisance au Canada et détient un statut 501 (c) (3) aux États-Unis. L'IISD reçoit un soutien opérationnel de base de la province du Manitoba et du financement de projets de nombreux gouvernements au Canada et à l'étranger, d'organismes des Nations Unies, de fondations, du secteur privé et de particuliers.

Émissions manquantes : Lacunes en matière de comptabilisation du carbone dans l'environnement bâti

Avril 2019

Rédigé par Seton Stiebert, Daniella Echeverria, Philip Gass et Lucy Kitson

Remerciements

Les auteurs désirent remercier les organisations et les individus suivants pour leurs précieux commentaires et recommandations formulés lors de la revue par les pairs de cette publication.

- Keith Brooks, Environmental Defence
- Trevor Hesselink, CPAWS
- Dr Jay Malcolm, Faculté de foresterie, Université de Toronto
- Jamie Meil, Athena Sustainable Materials Institute
- Jean-François Ménard, Centre international de référence sur le cycle de vie des produits
- Heidi Nesbitt, Local Practice Architecture + Design
- Dr Jeff Wells, Boreal Song Bird Initiative
- Scott Demark, Buildgreen Solutions

Les auteurs sont également reconnaissants envers Janet Sumner de Wildlands League pour sa contribution.

Ce rapport a été financé par l'Association Canadienne du Ciment.

Siège social

111, avenue Lombard, bur. 325
Winnipeg, Manitoba
Canada R3B 0T4

Tél : +1 (204) 958-7700

Site web : www.iisd.org

Twitter : [@IISD_news](https://twitter.com/IISD_news)



Résumé

Au Canada, on s'intéresse de plus en plus à la façon dont le choix des matériaux de construction peut affecter les futures émissions de gaz à effet de serre (GES) et à la question de savoir si la préférence pour un matériau de construction spécifique ou une combinaison de matériaux peut aider le Canada à réduire les émissions de GES de l'environnement bâti et atteindre les cibles de réduction des émissions.

Les critères mis au point pour sélectionner ces matériaux de construction proviennent d'études d'analyses du cycle de vie (ACV) qui tiennent compte des impacts des produits en termes de GES (et autres) à chaque phase de leur durée de vie « du berceau à la tombe » (c.-à-d. production, utilisation et fin de vie). Bien que l'ACV soit le meilleur outil disponible pour évaluer la performance en GES de produits de construction et de conceptions architecturales alternatives, les décideurs et les concepteurs de bâtiments doivent être conscients qu'elle comporte également des limites, des défis et des incertitudes considérables.

Le but de cette recherche est d'identifier :

- a) Les limites, les défis et les incertitudes liées aux ACV actuelles et de quantifier leur importance pour nous permettre de mieux comprendre la performance en matière de GES de bâtiments composés d'éléments structurels en béton, en acier ou en bois.
- b) Les meilleures pratiques qui pourraient améliorer la fiabilité et l'utilité de l'ACV afin de soutenir des politiques efficaces de décarbonisation de l'environnement bâti.
- c) Les opportunités à plus long terme de réduction des émissions dans l'environnement bâti sur l'ensemble du cycle de vie en soutenant les efforts de décarbonisation dans les secteurs du béton, de l'acier et des produits forestiers.

Résumé des conclusions

Les ACV existantes produisent des résultats très variables, même pour des bâtiments similaires, ce qui pose des défis aux décideurs.

Les résultats de l'ACV liés aux émissions de GES associées à différents matériaux de construction peuvent varier considérablement selon la façon dont les diverses hypothèses et incertitudes sont abordées. En général, ces hypothèses et incertitudes ne sont pas entièrement divulguées. De plus, les analyses de sensibilité ou d'autres techniques permettant de déterminer l'importance de ces hypothèses et ces incertitudes sur les résultats sont rarement effectuées (c'est-à-dire comment les hypothèses peuvent accroître l'incertitude entourant les résultats de l'ACV et / ou comment des hypothèses différentes pourraient produire des résultats très différents).

Les ACV comparant des matériaux de construction peuvent exagérer l'importance des impacts inhérents lorsqu'elles négligent ou ignorent la contribution d'autres émissions significatives du cycle de vie.

Bien que de nombreuses études d'ACV se concentrent sur les émissions de GES associées au cycle de vie de différents éléments structurels (généralement le béton, l'acier ou le bois), elles ont tendance à minimiser ou à ignorer les émissions du stade opérationnel ainsi que les impacts des autres systèmes du bâtiment (par ex. : la préparation du site, le chauffage et la ventilation, les structures additionnelles et l'ameublement). Cela peut mener à des conclusions erronées quant à la contribution relative des émissions liées aux matériaux de construction. Employés hors-contexte, ces résultats peuvent conduire à des décisions d'une portée trop étroite et ne tenant pas compte d'un tableau plus complet des possibilités de réduction des émissions dans les bâtiments.



Les variabilités régionales modifient sensiblement les émissions sur l'ensemble du cycle de vie.

La production d'acier au Canada est principalement répartie entre les aciéries à four à arc électrique (FEA), qui utilisent des matières premières en acier recyclé et de l'électricité renouvelable, et celles utilisant un convertisseur à oxygène pur, qui utilise du minerai de fer vierge. L'approvisionnement d'acier provenant d'usines à FEA permet de réduire les émissions par un facteur de deux à quatre par rapport à l'acier issu du convertisseur à oxygène ou de l'acier importé de Chine. Le type d'acier disponible est généralement déterminé par les marchés régionaux. Les émissions de fin de vie des produits de construction en bois dépendent en grande partie des conditions d'élimination. Les matériaux en bois enfouis sur des sites sans récupération ou brûlage du méthane peuvent générer jusqu'à 10 fois plus d'émissions en fin de vie que le bois éliminé dans des sites d'enfouissement qui récupèrent les gaz. Les émissions associées à l'extraction de matières premières pour l'acier et le béton présentent également une grande variabilité.

Les émissions de carbone biogénique et la séquestration liées à la production et aux étapes de fin de vie des produits de construction en bois renferment le taux d'incertitude le plus significatif des ACV existantes.

Alors que les émissions provenant de la production de béton et d'acier sont bien comprises, la comptabilisation des émissions et des puits dans le cycle de carbone biogénique des produits du bois est complexe et nécessite des modèles de bilan de carbone sophistiqués permettant de suivre les échanges entre différents réservoirs de carbone. Les études d'ACV n'analysent généralement pas le carbone biogénique, et supposent simplement que tout le carbone récolté est remplacé de manière durable par de nouveaux espaces forestiers dans le futur (c'est-à-dire la neutralité carbone). Parmi les critiques de cette hypothèse, citons le fait qu'elle ignore les émissions de GES significatives et mesurables causées par la perturbation des sols, les pertes de carbone résultant de la conversion de forêts anciennes et des taux de réussite sylvicole réels pouvant être considérablement inférieurs à 100 %. Des études antérieures ont également montré que seulement 15 % du carbone stocké dans un arbre est séquestré dans le produit ligneux final. Peu d'ACV tiennent compte des effets immédiats de ces pertes de carbone sur le climat, dû à la faible quantité de carbone stockée et au temps nécessaire pour récupérer ce carbone et d'autres pertes de carbone biogéniques lors de la croissance de nouvelles forêts.

Les analyses de sensibilité des hypothèses relatives au carbone biogénique suggèrent que les émissions de GES des produits du bois au cours du cycle de vie peuvent être considérablement plus élevées que celles présentées dans les ACV.

Sur la base d'une étude typique d'ACV, il est possible de tester les impacts sur le cycle de vie de la construction d'un bâtiment en bois par rapport à un bâtiment en béton, en contrôlant les effets sur les GES de trois scénarios de gestion forestière différents : un taux de réussite sylvicole de 90 %, une perte nette permanente de carbone dans le sol imputable à une coupe à blanc et des pertes de carbone résultant de la conversion de forêt primaire en forêt gérée secondaire.¹ Comparé à une base de référence supposant des émissions de carbone biogénique nulles tout au long du cycle de vie du bâtiment, et un cycle de vie du berceau à la tombe, les émissions des bâtiments en bois peuvent augmenter de 5 à 72 % selon le scénario. L'agrégation de ces impacts donne à penser qu'un bâtiment en bois pourrait générer davantage d'émissions intrinsèques qu'un bâtiment en béton. (Voir les figures ES1 et ES2.)

Dans une structure écoénergétique à longue durée de vie, les choix de matériaux de construction n'ont pas d'incidence sur les émissions de gaz à effet de serre, ce qui suggère que les réductions d'émissions intrinsèques ne devraient pas être recherchées au détriment de l'efficacité opérationnelle.

Bien que les impacts des matériaux sur les GES sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment varient légèrement en fonction des conditions climatiques régionales, du mix énergétique, de l'efficacité énergétique et de la longévité de

¹ Ces trois scénarios s'appuient sur des recherches forestières et représentent un large éventail de conséquences possibles et raisonnables qui reflètent les incertitudes identifiées. Ils ne représentent ni des résultats probabilistes, ni des conditions moyennes ou spécifiques pour une forêt aménagée donnée au Canada. D'autres recherches et des modélisations régionales seraient nécessaires afin de déterminer le degré de probabilité de ces impacts.



la structure, ces impacts demeurent modestes pour la plupart des bâtiments au Canada et démontrent à quel point il est essentiel de continuer à prioriser l'efficacité énergétique et la conception de bâtiments à longue durée de vie et à consommation énergétique faible ou nette zéro. Le choix des matériaux doit être effectué au cas-par-cas, selon leur contribution à améliorer les stratégies et la performance environnementale de la structure.

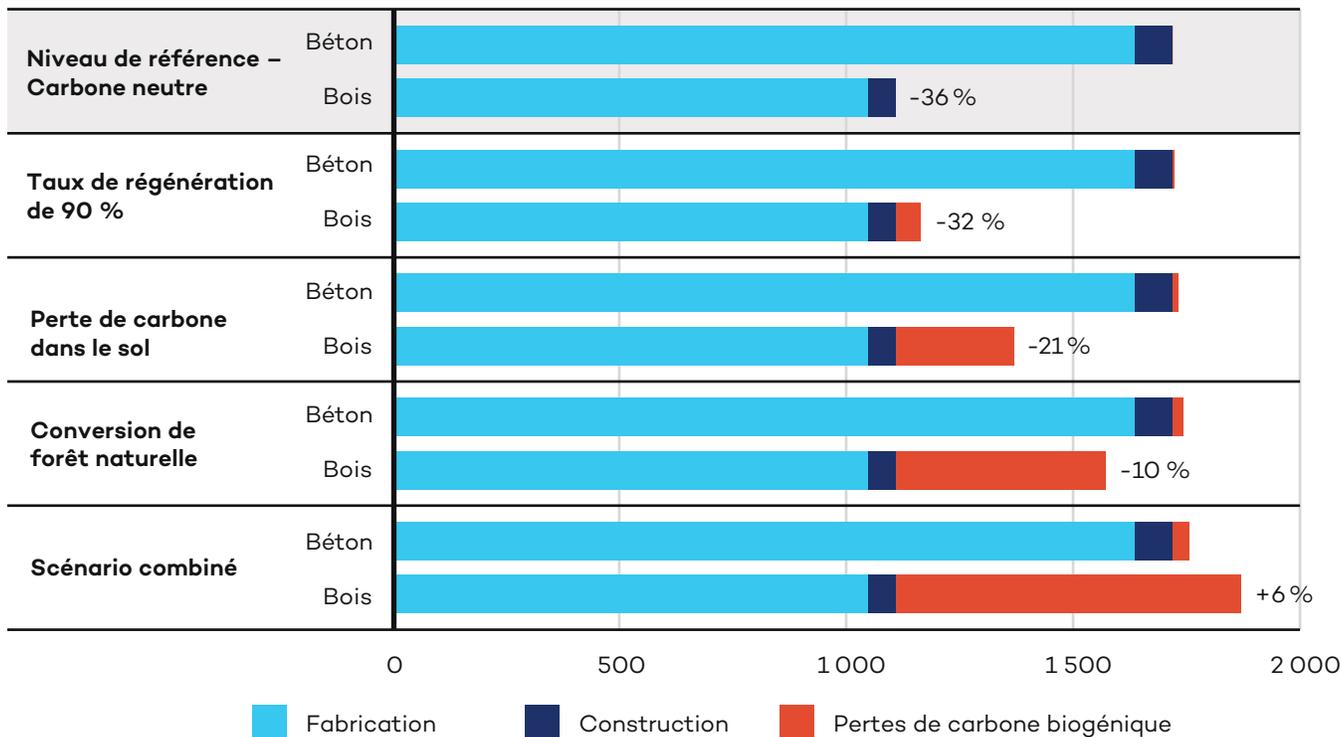


Figure ES1. Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment : construction en bois et en béton prenant en compte quatre scénarios de gestion forestière différents

Remarque : L'unité fonctionnelle est l'ensemble du bâtiment, basée sur une conception de bâtiment en béton et en bois ayant une efficacité opérationnelle et de service similaires.

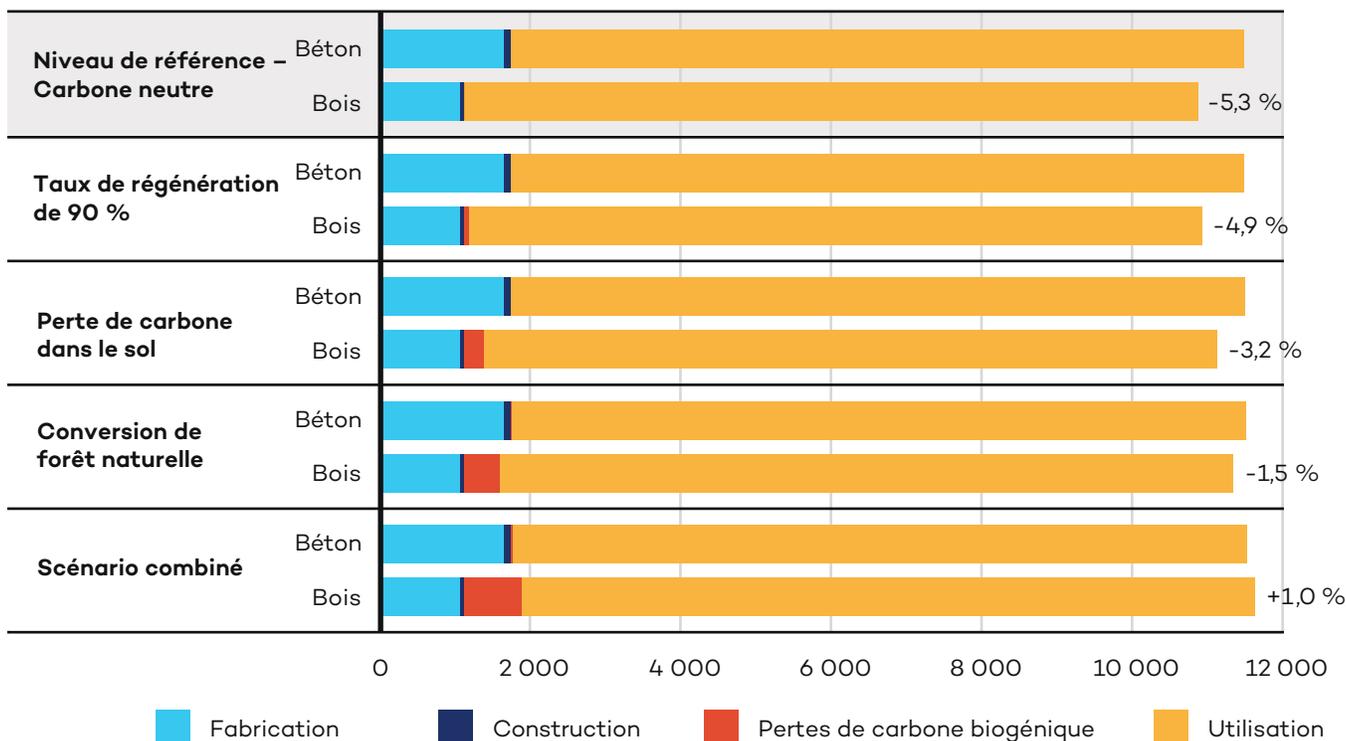


Figure ES2. Émissions intrinsèques et attribuables à l'utilisation du bâtiment s (tCO₂e)

Résumé des principales recommandations

Pour décarboniser l'environnement bâti, il est essentiel de privilégier l'efficacité et la longévité des bâtiments.

À court et à moyen termes, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la construction de nouveaux bâtiments à consommation énergétique faible ou nette zéro offrent le potentiel d'atténuation le plus élevé du secteur de l'environnement bâti. Une tarification efficace du carbone et des politiques complémentaires couvrant le secteur de la fabrication contribueront également à la décarbonisation des émissions intrinsèques aux matériaux de construction, même s'il est probable que la cadence de cette décarbonisation soit plus lente que celle liée à l'utilisation des bâtiments. En outre, les politiques devraient promouvoir la longévité et la durabilité des bâtiments, l'amélioration de l'efficacité des services et le réaménagement et le remodelage visant à prolonger la durée de vie des installations, qui entraînent tous des réductions d'émissions de GES significatives.

L'ACV est la meilleure approche à adopter, mais cette démarche nécessite davantage de données, de transparence et de normes robustes, en particulier pour le carbone biogénique.

Les décideurs et les professionnels de la construction qui cherchent à décarboniser les bâtiments doivent faire preuve de prudence lorsqu'ils prennent des décisions favorisant un matériau de construction à un autre. Les incertitudes, les hypothèses et les omissions dans les études d'ACV, en particulier en ce qui concerne les émissions de carbone biogénique des produits du bois, suggèrent que les comparaisons entre les matériaux de construction sont complexes. Beaucoup plus de transparence, de cohérence et de rigueur dans les données et les méthodologies d'ACV sont nécessaires pour rendre les comparaisons significatives, en particulier pour l'élaboration de politiques. A prime abord, le gouvernement fédéral devrait investir dans des inventaires actualisés du cycle de vie nationaux



et régionaux, y compris une comptabilisation réaliste du carbone pour les produits du bois qui tient compte des impacts du carbone biogénique régional sur le carbone séquestré net.

Pour lutter contre les émissions de GES intrinsèques aux bâtiments, les décideurs et les professionnels de la construction doivent privilégier tant l'efficacité des matériaux que l'encouragement à la décarbonisation dans tous les secteurs de fabrication de matériaux.

Chaque bâtiment est unique dans sa conception et, bien qu'au stade de cette élaboration, on puisse substituer dans une certaine mesure des éléments en bois, en acier ou en béton, chacun de ces trois matériaux est utilisé dans des proportions variables dans toutes les constructions. En outre, il existe divers stratégies, technologies et leviers politiques susceptibles d'inciter à la réduction des émissions de GES pour chaque matériau. Tous doivent être identifiés et encouragés de manière égale dans le cadre d'une stratégie robuste de décarbonisation de l'environnement bâti. En matière de choix des matériaux, les politiques climatiques et la conception de bâtiments à faibles émissions de carbone doivent tenir compte de l'efficacité des matériaux et du soutien à l'innovation à faibles émissions de carbone dans tous les matériaux. Pour le béton et l'acier, cela signifie récompenser les producteurs à faible émission de carbone et favoriser l'adoption des meilleures technologies disponibles, telles que l'utilisation de carburants de substitution faibles en carbone. Pour les produits du bois, des solutions prêtes à la commercialisation existent en matière de gestion forestière et de régénération qui permettent d'accroître les fonctions de puits naturels dans les forêts canadiennes et de contribuer à la réalisation des objectifs de réduction des émissions du Canada. Des réductions d'émissions de l'ordre de 60 à 80 % conformes aux objectifs à long terme du Canada nécessiteront des investissements à grande échelle dans de nouvelles technologies à faible émission de carbone, telles que le captage, l'utilisation et le stockage de carbone, ainsi que des changements importants dans les pratiques de gestion durable des forêts axées sur l'optimisation et la préservation des réservoirs de carbone biogénique (p. ex. éviter de défricher et de brûler des débris d'abattage, pratiques sylvicoles améliorées).



Contenu

1.0 Introduction	1
2.0 Méthodologie	3
2.1 Phase 1 : Étude ACV des matériaux de construction	3
2.2 Phase 2 : Impacts des incertitudes et de la variabilité régionale	4
2.3 Phase 3 : Impact de la décarbonisation et changements apportés à l'environnement bâti	4
3.0 Revue des ACV liées aux matériaux de construction	5
3.1 Choix du modèle d'ACV	5
3.2 Délimitation du système	7
3.3 Disponibilité et sélection des données	9
3.4 Transparence et clarté des hypothèses	9
3.5 Constatations typiques d'ACV et équivalence des modèles	10
3.6 Incertitude et variabilité régionale	13
4.0 Impact des incertitudes et de la variabilité régionale	18
4.1 Le cycle du carbone biogénique dans les produits du bois	18
4.1.1 Méthodologie de l'ACV et hypothèses comptables	18
4.1.2 Taux de régénération des forêts aménagées	20
4.1.3 Réservoir de carbone du sol	21
4.1.4 Durabilité à long terme des forêts aménagées	21
4.2 Analyse de sensibilité	24
4.2.1 Carbonatation à long terme du béton	27
4.3 Variabilité régionale	29
5.0 Objectifs climatiques à plus long terme	32
5.1 Efficacité énergétique et environnement bâti	32
5.1.1 Construction	32
5.2 Décarbonisation et durabilité	35
5.2.1 Le rôle du ciment dans le béton	35
5.2.2 Mesures à court terme pour réduire les émissions	36
5.2.3 Technologies révolutionnaires pour la réduction des émissions	37
5.2.4 Acier	37
5.2.5 Foresterie	39
6.0 Conclusions	42
6.1 Incertitudes et variabilités régionales	42
6.2 Meilleures pratiques en ACV	43
6.3 Développement de politiques	43
6.4 Besoins de recherche	44
6.4.1 Bois	44
6.4.2 Béton	44
6.4.3 Acier	44
6.4.4 Général	44



Références 46

Annexe A 53

Annexe B 57



Acronymes et abréviations

AGB	biomasse aérienne
BGB	biomasse souterraine
BOF	convertisseur à oxygène
CCS	captage et stockage du carbone
CSA	Association canadienne de normalisation (Groupe CSA)
EAF	four à arc électrique
FSC	Forest Stewardship Council
GES	gaz à effet de serre
Glulam	bois lamellé-collé
GWP	potentiel de réchauffement planétaire
GWP_{bio}	potentiel de réchauffement planétaire du dioxyde de carbone biogénique
PBR	produit de bois récolté
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ISO	Organisation internationale de normalisation
ACV	analyse du cycle de vie
PBR LD	produit de bois récolté de longue durée
OSB	panneaux à copeaux orientés
PCM	matériau à changement de phase
PEFC	Programme de reconnaissance des certifications forestières
SFI	Initiative de foresterie durable
SIP	panneaux structuraux isolants
PBR CD	produit de bois récolté de courte durée
SOC	carbone du sol
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques



1.0 Introduction

Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat révèle que le secteur du bâtiment détient le potentiel estimé d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) le plus élevé de tous les secteurs étudiés (Lucon et al., 2014). L'énergie associée à l'exploitation et à l'utilisation des bâtiments au Canada représente 12 % des émissions de GES (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b), tandis que les émissions de GES associées à l'environnement bâti représenteraient au moins 26 % des émissions nationales (GLOBE Advisors, 2017). De plus, on estime que la rénovation et l'occupation des bâtiments représentent un tiers des émissions mondiales de GES (Ghattas, Gregory, Olivetti et Greene, 2013). Des estimations précises des émissions totales au cours du cycle de vie des bâtiments (c.-à-d. comprenant à la fois les émissions d'énergie de fonctionnement et les émissions intrinsèques) au Canada ne sont pas disponibles.

Si le Canada veut atteindre ses objectifs climatiques, il est essentiel d'optimiser la conception, la construction et l'utilisation des bâtiments afin de réduire les émissions de GES. Jusqu'à présent, les trois niveaux de gouvernement ont fait des bâtiments un élément central des politiques d'atténuation du changement climatique, ciblant principalement l'efficacité énergétique, mais ces gouvernements démontrent également un intérêt croissant pour la façon dont le choix des matériaux de construction peut affecter les futures émissions de GES.

Les preuves permettant d'optimiser le choix des matériaux de construction ont été largement tirées d'évaluations du cycle de vie (ACV). L'ACV est une technique largement acceptée permettant d'évaluer systématiquement et quantitativement l'impact de différents matériaux ou produits tout au long des processus intervenant dans la vie d'un produit (c'est-à-dire la production, l'utilisation et la fin de vie – ou « du berceau au tombeau »). Un nombre considérable d'études menées au Canada, aux États-Unis et ailleurs dans le monde ont porté sur différents aspects du cycle de vie des émissions associées au choix des matériaux de construction. De nombreuses études d'ACV se concentrent sur une comparaison de bâtiments résidentiels ou commerciaux utilisant des éléments structurels alternativement en béton, en acier ou en bois. De plus en plus, ces types d'analyses de l'ACV sont utilisées pour quantifier et prévoir les émissions de GES et pour aider à élaborer des politiques visant à réduire les émissions de GES dans l'environnement bâti.

Le but de cette recherche est d'identifier dans la littérature actuelle des ACV ce qui influence le choix des matériaux de construction, en se concentrant sur la construction de bâtiments dont les éléments de charpente tels que planchers, murs et toits sont composés de béton, d'acier ou de bois. L'objectif est de comparer les émissions de ces trois matériaux à différentes étapes du cycle de vie du bâtiment et de cerner les incertitudes importantes dans l'analyse du cycle de vie. Cette recherche évalue également la matérialité des incertitudes identifiées et examine les mesures à prendre pour fournir des preuves suffisamment robustes et fiables pour l'élaboration de politiques visant à promouvoir la construction de bâtiments faibles en carbone et résilients au climat. Enfin, en quantifiant les incertitudes identifiées du point de vue des GES, la recherche met en évidence des sources d'émission spécifiques qui nécessitent un examen plus approfondi.

Le rapport se termine par des recommandations sur :

- La conduite de futures études d'ACV pour fournir des preuves plus claires des compromis, des opportunités, des avantages et des coûts des émissions de GES pour différents types de construction de bâtiments.
- L'élaboration de politiques qui optimisent l'efficacité avec laquelle le secteur du bâtiment peut être décarbonisé à court, moyen et longs termes, en reconnaissant que les matériaux de construction et les technologies connexes du secteur de la construction évoluent rapidement en réponse aux exigences du changement climatique, et que les impacts mêmes de ces changements impliquent que l'environnement bâti du milieu du siècle sera probablement très différent de celui d'aujourd'hui.



- La détermination de recherche supplémentaire, y compris l'amélioration de l'analyse de l'ACV et l'élaboration de politiques qui optimisent l'efficacité avec laquelle le secteur de la construction peut être décarbonisé à long terme.

Bien que l'étude se concentre principalement sur les bâtiments, et plus particulièrement sur les matériaux de construction en béton, en acier et en bois, ses conclusions et recommandations sont pertinentes pour les décisions plus générales relatives à l'environnement bâti visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant d'autres types d'infrastructure.

L'étude ne propose pas de quantifier de manière définitive les émissions de cycle de vie associées à une configuration de bâtiment spécifique ni de mener une nouvelle recherche primaire, mais vise plutôt à exploiter la littérature existante pour identifier les performances de différents matériaux et mettre en évidence les incertitudes et les opportunités permettant de réduire davantage les émissions futures.



2.0 Méthodologie

L'étude a été menée en trois phases principales, chacune correspondant à un élément essentiel de ce rapport. Elle se concentre sur un sous-ensemble relativement étroit d'ACV des bâtiments et tente de comparer les émissions des matériaux de construction utilisés pour les éléments de charpente (béton, acier, bois) tels que les sols, les murs et les toits. Ces types d'études peuvent aider les concepteurs de bâtiments, y compris les architectes et les ingénieurs, qui souhaitent comprendre si l'utilisation de moins d'un matériau et de plus d'un autre dans la structure du bâtiment peut entraîner une réduction nette des émissions pendant la durée de vie de celui-ci.

Au cours de la première phase, un examen des lignes directrices, méthodologies et documents existants sur l'ACV a été mené. Cet examen s'est ensuite appuyé sur une deuxième phase visant à analyser les principales incertitudes documentées et les principales variabilités prévisibles dans le contexte canadien. Dans certains cas, des simulations sur modèle ont été réalisées pour quantifier l'importance de ces incertitudes et variabilités. Lors de la phase finale, les impacts potentiels des changements de technologie et de l'environnement bâti et leur contribution aux objectifs climatiques à long terme ont été pris en compte. Les résultats des trois phases ont été analysés pour formuler des recommandations.

Pour pouvoir évaluer le rendement relatif, en terme d'émissions de GES, entre les différentes solutions de construction remplaçant un matériau de construction (béton, acier ou bois) par un autre, il est nécessaire de comptabiliser avec soin toutes les émissions et tous les puits de GES à toutes les étapes importantes de leur cycle de vie. Il est également important d'articuler clairement les méthodologies sélectionnées, les limites des systèmes, les sources de données, ainsi que les lacunes et les incertitudes potentielles des données, afin de juger de leur applicabilité, de leur pertinence et de leur importance relative dans la prise de décision.

Bien qu'un grand nombre d'outils et de lignes directrices relatifs à l'ACV aient été élaborés pour ce type d'évaluation, presque toutes les études d'ACV publiées reposent sur un ensemble d'hypothèses différentes qui peuvent avoir une incidence importante sur la performance relative déclarée de différents matériaux. Avant d'adopter un ensemble de politiques visant à optimiser les émissions de GES des bâtiments au cours du cycle de vie, par exemple en encourageant le remplacement d'un matériau par un autre sur la base d'études ACV, il est essentiel que les décideurs et les praticiens comprennent les hypothèses, la portée et les limites explicites et implicites de chaque étude ou ensemble d'études afin de déterminer si elles peuvent ou doivent être utilisées pour faire une comparaison valable des avantages d'un matériau sur un autre. Si le Canada veut atteindre ses objectifs climatiques, il est essentiel que les politiques élaborées atteignent l'objectif à long terme de décarbonisation en profondeur de l'environnement bâti et réduisent les émissions de GES de tous les matériaux. En tant que telle, l'étude a été menée en trois phases, comme décrit ci-dessous.

2.1 Phase 1 : Étude ACV des matériaux de construction

Une analyse de la littérature relative à la performance des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments a été réalisée, incluant notamment les normes ISO, les directives d'ACV et les règles relatives aux catégories de produits, les examens méthodologiques, les méta-études et des études ACV spécifiques. Cet examen donne un aperçu de la manière dont l'ACV est menée et des difficultés que pose la comparaison de matériaux de construction tels que le bois, le béton et l'acier; il identifie ensuite les principales incertitudes, lacunes dans les données et limites de l'analyse ACV. Il résume également les meilleures pratiques pour ce type d'analyse ACV et identifie de quelle manière ces pratiques pourraient améliorer la fiabilité et l'utilité des résultats pour la prise de décision politique. Des incertitudes importantes documentées dans la littérature par des experts du domaine ont été identifiées. Parmi ces incertitudes, on retrouve celles qui ont le plus important impact potentiel sur l'évaluation des émissions sur le cycle de vie de différents matériaux de construction. Les principales variabilités retrouvées dans le



contexte canadien sont également identifiées. L'analyse aborde les éléments clés d'un modèle, notamment le choix du modèle, les limites du système, les effets temporels et spatiaux, l'équivalence du modèle et ses données.

2.2 Phase 2 : Impacts des incertitudes et de la variabilité régionale

L'examen entrepris au cours de la phase 1 a permis d'identifier les principaux domaines d'incertitude associés aux émissions liées au cycle de vie de différents matériaux comme le béton, l'acier et le bois utilisés lors de la construction de bâtiments. L'examen a également permis d'identifier les principaux domaines de variabilité des émissions de GES au cours du cycle de vie qui résultent de l'emplacement géographique des bâtiments au Canada.

Pour chacune des incertitudes et des variabilités identifiées, une gamme de résultats d'émission ou d'absorption de GES a été déterminée selon le stade et processus du cycle de vie pertinents. Cet éventail, exprimé en émissions par unité de production ou en pourcentage des émissions intrinsèques totales, reflète des scénarios plausibles décrits dans la littérature pour les conditions de référence au Canada. Ces résultats donnent une indication de la variabilité potentielle des émissions intrinsèques (c.-à-d. jusqu'au départ de l'usine) ainsi que des émissions globales du cycle de vie (c.-à-d. du berceau au tombeau) pour différents matériaux utilisés dans les bâtiments au Canada.

2.3 Phase 3 : Impact de la décarbonisation et changements apportés à l'environnement bâti

La phase finale comprend un examen des possibilités d'efficacité énergétique de l'environnement bâti à long terme et des technologies susceptibles de soutenir les efforts de décarbonisation dans les secteurs du béton, de l'acier et des produits forestiers. Elle analyse les procédés modernes de production de matériaux de construction et les techniques de construction susceptibles de réduire l'intensité globale des émissions du bâtiment, y compris les technologies en cours de développement et les améliorations apportées aux pratiques opérationnelles. Elle examine également l'impact potentiel d'une augmentation de la demande des produits du bois sur la santé écologique des forêts.



3.0 Revue des ACV liées aux matériaux de construction

Bien que la méthodologie générale d'ACV soit bien définie dans la littérature, son application dans le secteur du bâtiment souffre d'un manque de normalisation (Rossi, Marique, Glaumann et Reiter, 2012). Les résultats de cette étude confirment cette observation.

Notre examen méthodique a permis de recenser des centaines d'articles scientifiques et de rapports sur les études d'ACV liées aux émissions de GES des bâtiments au cours de leur cycle de vie et à la performance relative de différentes constructions en béton, en acier et en bois. L'examen avait pour but d'identifier les meilleures pratiques pour la réalisation de ce type d'études de même que les principales incertitudes, limitations et lacunes dans les données pouvant affecter la fiabilité des résultats des études d'ACV. Ces résultats devraient être utiles aux praticiens menant des analyses d'ACV et aux décideurs politiques qui cherchent à évaluer équitablement la performance en matière d'émissions de gaz à effet de serre des bâtiments et à établir des politiques permettant de réduire au mieux les émissions de l'environnement bâti.

L'examen est organisé en fonction d'éléments clés de l'analyse du cycle de vie qui ont une incidence sur les émissions de GES, notamment : i) le choix du modèle d'ACV, ii) la délimitation du système, iii) la disponibilité et la sélection des données et iv) la transparence et la clarté des hypothèses. Les résultats généraux et les problèmes d'évaluation de l'équivalence des modèles sont ensuite présentés. Enfin, les incertitudes majeures et les variabilités régionales identifiées dans la littérature sont décrites. Dans la section suivante, l'impact potentiel de ces incertitudes et variabilités régionales est estimé.

3.1 Choix du modèle d'ACV

L'analyse du cycle de vie est un outil décisionnel essentiel pour comparer les matériaux utilisés dans la construction, mais il existe de nombreuses limites et difficultés pour assurer une juste comparaison. La sélection de l'étendue, du type et du modèle d'analyse ACV constitue la première étape.

L'analyse ACV spécifique aux émissions de GES doit tenir compte des sources et des puits de GES tout au long de la vie d'un produit. Le tableau 1 identifie les étapes et processus typiques employés dans les études d'ACV de bâtiments et de matériaux de construction. Ces étapes et processus sont communs à la plupart des analyses d'ACV et sont basés sur les principes généraux et les normes d'ACV des produits et services (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006; ISO 21930; EN 15978, 2011).

Tableau 1. Étapes et processus typiques inclus dans l'ACV des bâtiments

Étape	Processus importants (modules)
Stade de la production	Approvisionnement en matières premières / extraction
	Transport à l'usine
	Fabrication
Stade de la construction	Transport vers le site
	Construction et installation
Stade de l'utilisation	Utilisation ou occupation
	Entretien / Rénovation / Réparation / Remplacement / Réaménagement



Étape	Processus importants (modules)
Stade de la fin de vie	Déconstruction / démolition
	Transport pour l'élimination
	Traitement des déchets
	Élimination

Trois principaux types d'analyses du cycle de vie ont été identifiés et une description générale de chaque type d'ACV est fournie dans le tableau 2.

Tableau 2. Description des différents types d'ACV

Type d'ACV	Description	Avantages	Inconvénients
ACV des processus	Le type d'ACV le plus courant, basé sur les données des flux d'énergie et de matériaux pour des processus spécifiques (approche « bottom-up »).	Facile de déterminer chaque processus qui contribue aux émissions.	Impossible d'inclure tous les processus qui émettent des GES et des choix doivent être faits sur ce qu'il faut inclure et comment définir les limites du système. Bien que certaines bases de données, telle ecoinvent, modélisent les infrastructures associées aux activités de transformation, il est difficile de savoir exactement ce qui est inclus dans les limites du système et ces omissions peuvent créer une comparaison entre « des pommes et des oranges ».
ACV des intrants-extrants économiques	Basé sur une approche « top-down » utilisant des informations statistiques nationales sur les transactions monétaires entre les secteurs. Les intrants économiques d'un secteur, tel que celui du bâtiment, sont ensuite transformés en flux d'énergie et d'émission en utilisant une partition et une comptabilisation de l'énergie et des émissions pour l'ensemble de l'économie.	N'admet aucune erreur de troncature (c'est-à-dire, une incohérence ou une approximation résultant de l'exclusion de certaines sources potentielles d'émissions comme les services bancaires, publicitaires et juridiques) car tous les flux d'émission sont divisés en portions et inclus.	Ne convient pas pour comparer la performance relative de différents types de matériaux de construction. Associé à des transactions monétaires supposant un facteur d'émission d'entrée moyen basé sur tous les secteurs compris qui peuvent ou non être représentatifs du matériau de construction en question. N'inclut pas la séquestration du carbone, élément essentiel d'une ACV pour les bâtiments.
ACV hybride	Combinaison d'ACV des processus et des intrants-extrants économiques.	Équilibre les avantages des types d'ACV.	Utilisation restreinte en raison de sa sophistication et de sa complexité.

Bien que la méthode d'ACV des processus s'expose aux erreurs de troncature (différence ou approximation résultant de l'exclusion de certaines sources potentielles d'émissions comme les services bancaires, publicitaires et juridiques en raison de la nécessité de définir une limite de système), c'est le seul type d'ACV qui peut aider à déterminer la performance relative de l'utilisation de matériaux tels que le béton, l'acier et le bois dans la construction, car cette méthode permet au modélisateur de déterminer la contribution des émissions liées à chaque processus et à chaque étape du cycle de vie.

Dans l'ACV des processus, il existe également une distinction entre ACV « attributionnelle » et ACV « consécutive ». Presque toutes les études d'ACV sur des matériaux différents sont des ACV d'attribution qui se concentrent sur les impacts des GES en régime stationnaire, c'est-à-dire qu'elles supposent que les facteurs d'émission ne changent



pas dans le temps ni en réponse à la demande. Bien que les ACV par attribution conviennent à des évaluations de bâtiments individuels à un moment donné, elles ignorent les répercussions à plus grande échelle des GES résultant, par exemple, d'une demande accrue d'un produit sur un autre pouvant être créée par différentes interventions politiques. Les ACV consécutives cherchent à quantifier les impacts au niveau du système qui se produiraient si l'utilisation d'un produit augmentait. Ce type d'étude d'ACV cherche à comprendre comment l'évolution de la demande globale affecte la chaîne d'approvisionnement et les futurs niveaux d'émission.

Une ACV consécutive peut être particulièrement importante dans le contexte de politiques et de décisions qui favorisent l'utilisation d'un matériau par rapport à un autre. Une augmentation de la demande peut avoir des effets surprenants sur l'intensité des émissions du cycle de vie de la production.

Dans le cas des matériaux de construction en bois, une augmentation de la demande en bois a un impact direct sur la capacité des forêts à constituer des stocks de carbone durables, modifiant potentiellement les performances d'émission attendues de ces matériaux. Dans le cas du béton, une augmentation de la demande pourrait entraîner des problèmes d'approvisionnement local en matières premières et augmenter les émissions liées aux matières premières et leur extraction. Dans le cas de l'acier, une augmentation de la demande devra peut-être être satisfaite par des importations en provenance de pays appliquant des méthodes de production produisant davantage d'émissions que l'acier produit au Canada.

Les modèles d'ACV doivent également tenir compte des émissions lorsqu'elles se produisent. Dans les analyses d'ACV, il est courant d'ajouter les émissions susceptibles de se produire sur une très longue durée de vie. Si une émission qui se produit au début d'un projet pendant la phase de production est considérée comme ayant le même poids ou le même potentiel de réchauffement planétaire qu'une émission qui se produit 50 à 100 ans plus tard et qui est liée au stade de la fin de vie, cela peut présenter une incohérence et conduire à des conclusions scientifiquement indéfendables. Cela est dû au fait que les émissions qui se produisent à différents moments ont un effet cumulatif de forçage radiatif très dissemblable. Le forçage radiatif est une mesure de l'influence des émissions de gaz à effet de serre sur la modification de l'équilibre entre l'énergie entrante et sortante dans le système atmosphérique terrestre et un indice de l'importance de ce facteur en tant que mécanisme potentiel de changement climatique. Si ces émissions sont traitées sur un pied d'égalité, l'analyse tient compte des émissions de départ qui ont persisté dans l'atmosphère pendant la durée de vie du bâtiment au même titre que les émissions de fin de vie qui ne contribueront au réchauffement de la planète que beaucoup plus tard.

3.2 Délimitation du système

Idéalement, les études d'ACV qui se concentrent sur la performance relative en GES de différents matériaux de construction devraient inclure toutes les étapes du cycle de vie identifiées dans le tableau 1 (c.-à-d. du berceau au tombeau). Sans cette évaluation approfondie du cycle de vie complet des matériaux de construction, de l'extraction à l'élimination finale en fin de vie ou à la réutilisation, il est difficile de déterminer quel type de construction conduit à une réduction relative des émissions de GES et quelle est sa contribution au réchauffement planétaire.

Certaines études d'ACV choisissent de se concentrer uniquement sur des étapes spécifiques du cycle de vie, en fonction de leur objectif et de leur conception. Par exemple, de nombreuses études d'ACV sur les bâtiments portent uniquement sur les émissions incorporées aux étapes de production et de construction des matériaux au tableau 1. Ces études peuvent ne pas s'intéresser aux émissions liées à l'utilisation de ces bâtiments, parce qu'elles considèrent que tous les matériaux résultent en une même demande en énergie et génèrent les mêmes émissions, ou parce que cette étape présente peu d'intérêt pour le but de la recherche. **Les décideurs doivent se méfier des résultats d'études n'incluant pas toutes les étapes du cycle de vie, car l'important est la performance absolue en matière d'émissions de GES, par opposition aux variations à l'intérieur des différentes étapes de l'ACV.**



D'autres études ACV négligent d'inclure différents sous-processus (p. ex., le défrichage pour l'exploitation de mines ou de carrières) à chaque étape de l'ACV en raison soit d'un manque de données, soit de l'hypothèse selon laquelle ces processus ne contribuent pas de manière significative à une différence relative d'émissions entre les différentes approches de construction. D'autres études d'ACV incluent certains processus, mais leur traitement est fortement simplifié et les résultats peuvent être trompeurs. Les hypothèses relatives aux émissions de fin de vie et au recyclage des matériaux sont particulièrement préoccupantes pour les études d'ACV de bâtiments, car elles sont rarement traitées de manière complète (Rossi et al., 2012). Les émissions de GES non liées à l'utilisation de l'énergie (par exemple, biogéniques) sont également souvent exclues des études d'ACV qui utilisent exclusivement des flux d'énergie pour estimer les émissions. **Avant d'accepter une étude d'ACV comme preuve d'une performance supérieure d'un matériau de construction en matière de GES, les décideurs doivent examiner attentivement les limites du système afin de détecter les lacunes et les limitations susceptibles d'avoir une incidence importante sur les conclusions.**

Selon les meilleures pratiques en matière d'inclusion ou d'exclusion des émissions, tous les flux d'intrants négligés ne doivent pas dépasser 5 % de tous les modules des différentes étapes du cycle de vie indiqués dans le Tableau 1 (ISO 21930, 2017).

Les études d'ACV doivent s'assurer de ne pas comptabiliser deux fois les réductions d'émissions associées aux activités de réutilisation, de recyclage et de valorisation énergétique. En vertu de la norme ISO 21930, le « rendement net » de matériaux secondaires ou de combustibles est traité au paragraphe 5.2 ; et garantit que le double comptage de tout flux de matériaux, d'énergie et de ressources résultant d'activités de réutilisation, de recyclage ou de valorisation énergétique (associés à la chaîne logistique du produit étudié, et celle d'un système antérieur et/ou ultérieur) sera interdit ou non autorisé. **L'accent devrait être mis sur les émissions de GES résultant directement des différents processus de traitement en fin de vie (élimination, réutilisation, recyclage et / ou valorisation énergétique) et non sur une évaluation des émissions susceptibles d'être déplacées.**

Bien que les éléments de structure des bâtiments soient généralement identifiés comme étant les éléments contribuant le plus aux émissions totales de GES, la plupart des études excluent une partie importante de ces éléments tels que :

1. Autres systèmes du bâtiment (par exemple, chauffage et ventilation, installations sanitaires, gicleurs)
2. Structures supplémentaires (par exemple, canalisations, balcons, escaliers, murs intérieurs, fenêtres, finitions)
3. Ameublement, électroménagers
4. Émissions liées à la préparation du site (p. ex. Excavation, remblayage, stabilisation du sol)

Ceci est important, car l'analyse des émissions du cycle de vie complet a révélé que ces éléments de construction peuvent dominer les émissions totales des bâtiments (Ruuska et Häkkinen, 2015); il en résulte que les éléments structuraux en béton, acier ou bois jouent un rôle moins important.

L'analyse des limites des systèmes de la littérature existante sur les ACV montre qu'il est difficile de faire des comparaisons significatives entre différentes études d'ACV sur des bâtiments et qu'il convient de les aborder avec prudence, en raison des nombreuses dimensions des ACV, notamment des objectifs différents et des limites de système différentes.



3.3 Disponibilité et sélection des données

La collecte de données pour l'ACV implique de dresser un inventaire de tous les intrants et extrants nécessaires aux processus dans les limites du système. Cela nécessite de grands ensembles de données sur l'énergie intrinsèque et les facteurs d'émission pour les matériaux de construction. La plupart des praticiens de l'ACV s'appuient sur des ensembles de données publiés commercialement plutôt que de développer leur propre ensemble de données. Ces données publiées utilisent généralement des moyennes géographiques très larges (par exemple, l'Amérique du Nord) qui peuvent ne pas être pertinentes pour l'offre et la production de matériaux pour différentes régions du Canada. Les ensembles de données pouvant fournir une représentation régionale de la production, de la construction, de l'utilisation et des émissions en fin de vie sont préférables, mais ne sont que rarement disponibles. **Il est recommandé que le gouvernement fédéral investisse dans un inventaire national actualisé et régionalisé du cycle de vie.**

L'âge d'une étude d'ACV et des données sous-jacentes soulève également une préoccupation potentielle. Les facteurs d'émission et d'énergie intrinsèque, ainsi que les taux de recyclage, ont considérablement évolué au fil du temps pour de nombreuses étapes du cycle de vie du béton, de l'acier et des produits en bois. **Il est recommandé que les ensembles de données utilisés pour calculer les émissions du cycle de vie soient limités aux 10 dernières années (ISO 21930, 2017). Les études d'ACV publiées avant 2008 sont peu supportées par les tendances actuelles des émissions.**

3.4 Transparence et clarté des hypothèses

Les revues qui ont examiné les études d'ACV des bâtiments (Rossi et al., 2012; Ghattas et al., 2013), de même que notre propre analyse, ont révélé que la plupart des études d'ACV ne rapportaient pas leurs hypothèses et fournissaient peu d'informations de base sur la manière dont sont calculées les émissions de GES à chaque étape du cycle de vie. Compte tenu de la complexité et du volume de calculs requis, cela n'est pas surprenant. Les normes ISO appellent à une présentation compréhensible, transparente et complète des informations d'ACV. **Une pratique exemplaire consisterait à dresser une liste complète des hypothèses utilisées dans une ACV.**

Notre examen indique que, dans la plupart des études :

- Les détails explicites des processus à chaque étape du cycle de vie ne sont pas présentés et il est donc difficile de savoir s'il y a des omissions majeures.
- Les facteurs d'émission et les données sur l'énergie intrinsèque ne sont pas présentés et, souvent, la source des données n'est pas citée.
- Une ventilation des émissions, même au plus haut niveau, par étape du cycle de vie, n'est pas toujours fournie. Bien qu'une ventilation par processus soit irréaliste, il convient d'indiquer des références claires aux jeux de données utilisés.
- Les hypothèses concernant les taux de recyclage et de réutilisation des matériaux ne sont pas présentées et il est difficile de savoir dans quel contexte ou dans quelle région elles s'appliquent (voir la section 3.6 Incertitude et variabilité régionale ci-dessous).

Le manque général de transparence constaté dans les études d'ACV empêche de tirer des conclusions générales pour supporter l'examen par les pouvoirs publics.



3.5 Constatations typiques d'ACV et équivalence des modèles

Chaque bâtiment est unique dans sa conception et utilise souvent les trois matériaux décrits dans le présent document. En d'autres termes, l'environnement bâti nécessitera probablement toujours du bois, de l'acier et du béton dans des proportions variables. La plupart des études d'ACV indiquent que les émissions résultant de l'utilisation (émissions résultant de l'exploitation et de l'occupation du bâtiment : chauffage, climatisation, éclairage, etc.) représentent en moyenne 80 % des émissions, mais cette estimation varie considérablement selon le taux d'efficacité du bâtiment, le climat régional et les limites du système de l'analyse ACV. La température régionale au Canada a une influence importante sur les émissions d'utilisation : à Vancouver, elles sont généralement plus proches de 60 à 70 %, alors que dans les régions moins modérées comme Toronto, elles peuvent dépasser 90 %. Elles dépendent aussi beaucoup de la durée de vie anticipée du bâtiment, de l'exclusion et l'inclusion d'autres éléments de construction, et de la prise en compte des travaux de rénovation ou d'aménagement. Des durées de vie plus courtes accroissent l'importance des émissions incorporées, alors que, dans les structures à plus longue durée de vie, l'efficacité opérationnelle devient la considération dominante en matière de GES.

Le rapport entre le stade d'utilisation et toutes les autres émissions du cycle de vie est très important car il met en évidence les domaines dans lesquels les efforts de réduction des émissions doivent être ciblés. Si plus de 80 % des émissions proviennent clairement de l'utilisation (Biswas, 2014; Robertson, Lam et Cole, 2012; Sathre, 2007), il est clair que des politiques améliorant l'efficacité énergétique et l'approvisionnement en énergie renouvelable des bâtiments aura un impact bien plus important que le traitement des émissions incorporées provenant de la fabrication des éléments structurels d'un bâtiment. Cela est particulièrement vrai pour les climats moins modérés avec des épisodes extrêmement froids et chauds, où l'énergie nécessaire au chauffage / refroidissement et à la ventilation des locaux est une source importante d'émissions. De nombreuses ACV de bâtiments comparant différents matériaux de construction montrent simplement une préférence pour une construction plus économe en énergie (c'est-à-dire dont la valeur d'isolation est supérieure).

Cependant, à mesure que l'efficacité énergétique des bâtiments augmente et que les combustibles utilisés au stade de l'exploitation opérationnelle sont décarbonisés, les émissions incorporées des matériaux de construction peuvent devenir un facteur de plus en plus important (sachant que le choix des matériaux joue également un rôle important dans la conception et la performance écoénergétique). Même en l'absence de politiques supplémentaires en matière de carbone, le troisième rapport biennal du Canada sur les changements climatiques prévoit que l'intensité d'émission opérationnelle des bâtiments diminuera de 20 % d'ici 2030 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017a). Différentes stratégies à faibles émissions de carbone pour les bâtiments, telles que la politique de la Commission européenne sur la réduction des émissions de carbone et le projet *Pathways to decarbonization in Canada* (Bataille, Sawyer et Melton, 2015) suggèrent qu'il est concevable que les émissions opérationnelles puissent diminuer de plus de 80 % d'ici 2050. Bien qu'il soit possible de spéculer que la consommation d'énergie opérationnelle dans les bâtiments peut être en grande partie décarbonisée, les émissions de matériaux de construction provenant d'autres étapes du cycle de vie deviendront de plus en plus importantes et les efforts de décarbonisation de ces matériaux pourront également permettre des réductions importantes. **Dans tous les cas, les politiques et les décisions devraient simultanément conduire à la réduction des émissions des bâtiments à tous les stades de leur cycle de vie.**

La figure 1 illustre la contribution relative des différentes émissions liées aux étapes du cycle de vie par rapport aux émissions totales des bâtiments. Les données ont été compilées à partir de 15 études et analyses d'ACV de bâtiments différents qui présentaient les émissions du cycle de vie de nombreux bâtiments, régions et limites du système. L'étendue des données est basée sur les résultats du cinquième et du 95^e centiles des points de données (voir l'annexe A pour les données). Tel qu'illustré dans la figure, l'éventail de l'impact est très large. L'importance relative de chaque étape est affectée principalement par les besoins en énergie de fonctionnement, les différentes



combinaisons d'approvisionnement en énergies régionales, les différentes limites des systèmes choisis par les études d'ACV et, dans une moindre mesure, par le choix des matériaux de construction.

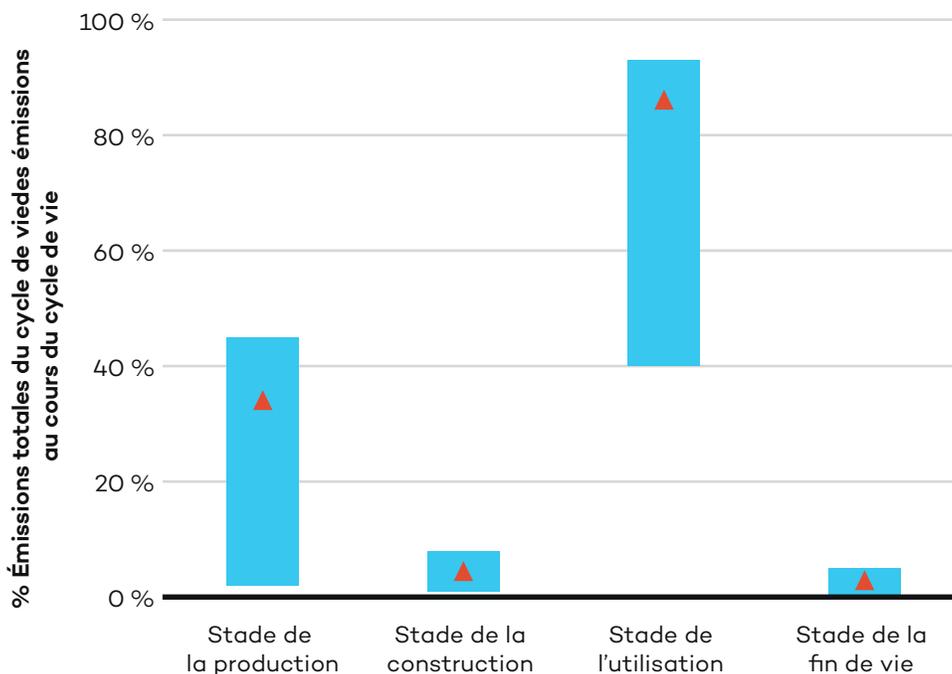


Figure 1. Étendue et contribution moyenne des émissions des différentes étapes du cycle de vie aux émissions totales des bâtiments rapportées dans la littérature¹

Remarque : la contribution moyenne pour chaque étape du cycle de vie est basée sur la moyenne des valeurs identifiées dans la littérature; de ce fait, le total cumulé n'est pas de 100 %.

Plusieurs observations générales peuvent être tirées de la Figure 1 :

1. Le stade du cycle de vie relié à l'utilisation est généralement dominant. Bien que cette étape perd de son importance relative pour les bâtiments écoénergétiques et les études tenant compte d'une durée de vie opérationnelle plus courte, elle est toujours responsable de plus de 40 % des émissions dans toutes les ACV étudiées et contribue en moyenne à 80 % des émissions au cours de la durée de vie totale.
2. Les émissions au stade de la construction sont généralement faibles et ne sont généralement pas significatives pour les émissions totales du cycle de vie.
3. Les émissions au stade de la production peuvent ou non contribuer fortement aux émissions totales, en grande partie selon l'importance des émissions du stade de l'utilisation.
4. Les émissions au stade de la fin de vie sont généralement faibles. Les études de fin de vie incluant des crédits pour le recyclage et la réutilisation de matériaux de construction ont été exclues, sur la base des directives ISO.

Pour effectuer une comparaison entre les matériaux de construction, une unité fonctionnelle commune de comparaison est requise. La définition d'une unité fonctionnelle a pour but de garantir que les services fournis par les bâtiments sont équivalents, par exemple en termes de performance structurelle, de performance énergétique, d'acoustique, de

¹ Les données ne sont pas spécifiques aux constructions en béton, en acier ou en bois, et on peut s'attendre à de légères variations, en particulier pour les émissions en fin de vie.



réparations et de rénovations. La plupart des études d'ACV des processus utilisent la surface utile (m^2) pour l'ensemble d'un bâtiment en tant qu'unité fonctionnelle. Quelques études considèrent le nombre d'occupants, le bâtiment entier ou d'autres unités fonctionnelles. Le but des unités fonctionnelles telles que la surface utile est de pouvoir comparer des matériaux ayant des performances techniques différentes au sein d'une même étude, de manière à utiliser une référence de comparaison basée sur le niveau de service. Les unités de GES par unité de masse ou de volume de matériau sont généralement inadéquates, car des masses ou des volumes égaux ne remplissent pas la même fonction.

Un examen exhaustif des études d'ACV sur bâtiments sur la base de la surface en m^2 (Säynäjoki, Heinonen, Junnila et Horvath, 2017) montre des variations des émissions intrinsèques (de la fabrication à la sortie de l'usine) entre de nombreuses études. Dans la figure 2, la variation des émissions incorporées par m^2 , est comparée pour les bâtiments commerciaux dont les éléments de charpente sont principalement constitués de béton, d'acier et de bois (voir les données à l'annexe A). Toutes les études incluses dans la figure sont basées sur des ACV de processus, mais représentent de nombreuses régions climatiques, tailles de bâtiments et utilisations différentes. Les données ne sont pas représentatives de la géographie du Canada mais donnent une idée des résultats généralement trouvés dans la littérature.

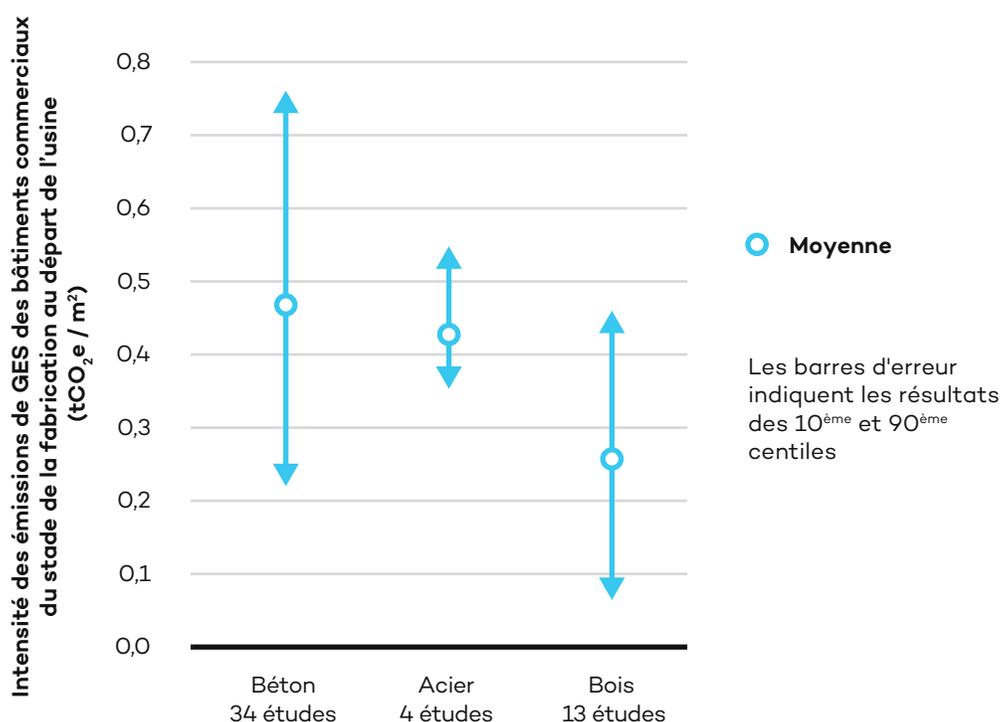


Figure 2. Intensité des émissions de GES des bâtiments commerciaux du stade de la fabrication au départ de l'usine (tCO_2e / m^2)

La figure 2 indique que l'intensité des émissions des bâtiments en bois est inférieure (performance supérieure) à celle des bâtiments en béton et en acier dans la majorité des cas. Cependant, les variations des émissions sont importantes et Säynäjoki et al. (2017, p. 1) note : « Ce sont les problèmes méthodologiques et les choix subjectifs du praticien en ACV qui causent la grande majorité de l'énorme variance dans les résultats.... Actuellement, les ACV publiées pour les bâtiments n'offrent pas d'informations de base pour l'élaboration de politiques sans une compréhension approfondie des prémisses d'une certaine étude et de bonnes connaissances méthodologiques. »



La méthodologie de l'ACV, la zone climatique, l'emplacement géographique, les inclusions et les exclusions spécifiques aux limites du système, la composition de l'offre énergétique et les méthodes de production jouent probablement un rôle important dans la variance élevée observée à la Figure 2. Cependant, sans tous ces détails qui sont rarement précisés dans les études, les décideurs ne peuvent pas en déduire pourquoi les résultats varient considérablement et quels choix de produits ou quelles politiques relatives à l'environnement bâti peuvent effectivement conduire à une réduction des émissions des bâtiments.

Il existe d'importantes interdépendances par lesquelles le choix d'un matériau de construction peut influencer sur le choix des autres matériaux de construction. Par exemple, les éléments structurels qui sont comparés peuvent avoir un rendement différent en termes d'isolation et de performance thermique et par conséquent des rendements énergétiques différents et / ou des systèmes énergétiques différents adaptés aux différentes propriétés des matériaux (par exemple, la masse thermique); ils peuvent avoir différentes caractéristiques structurelles et nécessitent par conséquent plus ou moins de matériaux et d'éléments structurels (par exemple, des fondations et des pieux); ou ils peuvent nécessiter un programme d'entretien différent ou avoir une durée de vie opérationnelle différente. Cette interdépendance nécessite une attention toute particulière dans une analyse d'ACV.

Les hypothèses de la phase opérationnelle, en termes de performance relative de bâtiments conçus principalement en bois, en béton ou en acier, sont cruciales pour l'évaluation de la performance globale de différents matériaux.

Plus la durée de vie d'un bâtiment est longue, plus les émissions intrinsèques dans les matériaux de construction sont amorties avec le temps, réduisant potentiellement l'impact global, tant que la performance en matière d'efficacité énergétique n'est pas compromise. **Cela indique que la durabilité et la longévité des bâtiments, l'efficacité opérationnelle et les sources d'énergie faibles en carbone devraient être l'objectif premier des politiques et des codes du bâtiment en vue de réduire les émissions de GES.**

En conclusion, la littérature sur l'ACV des bâtiments présente des résultats très variables, même lorsque l'on évalue des bâtiments très similaires (Säynäjoki et al., 2017). **Les décideurs doivent comprendre comment différents choix et hypothèses méthodologiques peuvent affecter les émissions sur l'ensemble du cycle de vie des matériaux de construction dans l'analyse ACV.**

3.6 Incertitude et variabilité régionale

Nous avons constaté que les études d'ACV sur le bâtiment publiées dans des revues scientifiques rapportaient rarement des incertitudes (Blengini et Di Carlo, 2010; Ghattas et al., 2013) ou une analyse de sensibilité de variables importantes qui contribuent à l'incertitude des résultats (Rossi et al., 2012). **L'absence d'analyse de sensibilité est un inconvénient majeur à l'interprétation des résultats, et les meilleures pratiques d'ACV devraient inclure une analyse de sensibilité des variables clés.** De nombreuses études d'ACV publiées dans des revues scientifiques n'incluent pas nécessairement l'analyse de sensibilité par manque d'espace ou de pertinence par rapport à leurs objectifs, alors que les études d'ACV à l'appui des déclarations environnementales de produits les incluent presque toujours.

En raison de la complexité des analyses ACV, cette étude n'a pas été en mesure de procéder à une évaluation rigoureuse et complète des intrants et des hypothèses qui génèrent de l'incertitude dans les résultats de l'ACV. Cette analyse distingue donc entre l'incertitude des facteurs d'émission des intrants et les calculs d'émission liés au choix du modèle d'ACV par rapport aux hypothèses de données relatives à l'emplacement du bâtiment (c'est-à-dire la variabilité régionale). Les hypothèses régionales dans les études d'ACV sont généralement dictées par les besoins individuels et la disponibilité des données de chaque étude d'ACV. De nombreuses études ACV examinées ne sont pas spécifiques à une région du Canada et ne tiennent donc pas compte des profils uniques d'offre et de demande d'énergie, d'intensités de production de matériaux et de construction de bâtiments existant dans les différentes régions du pays.



Les émissions associées à la consommation d'énergie d'origine fossile et électrique à chaque étape du cycle de vie sont bien documentées dans la littérature et relativement faciles à calculer et à suivre à l'aide des modèles d'ACV existants. Les émissions non liées à l'énergie et celles associées aux procédés industriels nécessaires à la production d'acier et de béton sont également bien documentées. Cela signifie que la grande majorité des émissions du béton et de l'acier aux stades de la production, de la construction et de l'utilisation présentent une incertitude relativement faible.

Tous les matériaux de construction en béton, en acier et en bois présentent une incertitude significative pour les émissions en fin de vie; cependant, cette étape est beaucoup moins importante que les étapes de production et d'utilisation par rapport aux émissions totales.

L'incertitude la plus importante du point de vue des émissions de GES, qui est souvent ignorée dans l'analyse ACV, concerne les émissions et la séquestration du carbone biogénique liées aux étapes de production et de fin de vie du bois. Les émissions indirectes dues aux changements d'affectation des sols associés au défrichage des terres en vue de l'extraction minière et de l'exploitation en carrière de matières premières ne sont pas non plus bien documentées et devraient être examinées de plus près. Bien que l'ouverture de nouvelles mines ou carrières soit susceptible de générer d'importantes émissions liées à l'utilisation des sols sur une courte période, l'amortissement de ces émissions sur la durée de vie de l'exploitation et pour tous les produits de construction fabriqués à partir des matières premières réduit l'importance relative de ces émissions dans l'analyse ACV.

Il est à noter que la variabilité régionale peut être élevée pour presque toutes les sources d'émission à tous les stades du cycle de vie, et nous nous concentrons sur celles qui sont susceptibles de contribuer le plus à l'évolution des émissions totales.

Sur la base de la revue de la littérature, les principales incertitudes sont identifiées dans le tableau 3 et les principales variabilités régionales sont identifiées dans le tableau 4. Des recommandations pour leur traitement dans les études ACV sont également fournies dans le tableau. La section 4 examine l'impact potentiel de ces incertitudes et des variabilités régionales sur les résultats de l'ACV.



Tableau 3. Principales incertitudes identifiées dans les émissions d'ACV des bâtiments pour les éléments de construction en béton, en acier ou en bois

Principale incertitude	Stade du cycle de vie	Description de l'incertitude	Recommandation pour l'analyse ACV
Le cycle du carbone biogénique dans les produits du bois	Stades de la production et de la fin de vie	<p>Presque toutes les études d'ACV simplifient à outrance l'analyse des produits du bois et les considèrent comme carboneutres (Blengini et Di Carlo, 2010 : Globe Advisors, 2017; Ochsendorf et al. 2011 : Roberston et al. 2012 : Salazar, J. et Meil. J 2009).</p> <p>Cette hypothèse peut être raisonnable si les produits de construction en bois sont fabriqués à partir de bois provenant de forêts gérées de manière durable et pouvant raisonnablement prétendre à la neutralité carbone - par exemple, les émissions de carbone biogénique sont séquestrées dans les mêmes forêts en croissance au fil du temps.</p> <p>Cependant, faire cette hypothèse de manière générale pour toutes les forêts certifiées ignore une comptabilisation très complexe du carbone et un enjeu sujet à d'important débats. Les systèmes de certification durables sont conçus autour de multiples valeurs écologiques et économiques et ne sont pas nécessairement destinés à optimiser ou à mesurer les bilans de carbone.</p> <p>Il existe une grande incertitude quant à savoir si les pratiques de gestion forestière peuvent assurer la permanence des puits et si les risques importants associés aux incendies, aux ravageurs, aux changements climatiques et aux pressions de l'utilisation des sols sont dûment pris en compte. Par exemple, le carbone du sol est le plus grand réservoir de carbone de la forêt, et il a été démontré que les pratiques de récolte entraînent un déclin à long terme du carbone du sol et la libération de carbone organique du sol sous forme de dioxyde de carbone dans l'atmosphère en raison des perturbations de la récolte, ce qui peut affecter de manière significative le solde des émissions (Achat et al., 2015).</p>	<p>Les études d'ACV doivent énoncer leurs hypothèses de manière transparente et prendre en compte les sources d'émissions et les puits à mesure qu'elles se produisent (indiquant les flux de carbone biogénique à chaque stade du cycle de vie). Pour le bois, le carbone biogénique peut être caractérisé par un coefficient de concentration biogénique de $-1 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kg CO}_2$</p> <p>uniquement lorsque le bois provient de forêts gérées de manière durable (ISO 21930, 2017).</p> <p>Les flux de CH₄ biogénique doivent également être inclus.</p>
Séquestration de carbone à long terme par l'absorption de gaz carbonique par le béton	Stade de la fin de vie	<p>Plusieurs études dans la littérature indiquent qu'aux stades de l'utilisation et de l'élimination, les éléments de construction en béton peuvent absorber en permanence des quantités importantes de dioxyde de carbone de l'atmosphère.</p> <p>La norme ISO 21930 fournit des lignes directrices sur les méthodes reconnues pouvant être utilisées pour calculer la carbonatation.</p>	<p>Les études d'ACV devraient indiquer si la séquestration du carbone à long terme est liée à l'absorption de dioxyde de carbone par le béton, et, dans l'affirmative, quelles méthodes de calcul ont été utilisées.</p>



Tableau 4. Variables clés qui contribuent à la variabilité régionale dans les estimations des émissions d'ACV des bâtiments au Canada

Variables clés qui contribuent à la variabilité régionale	Stade du cycle de vie	Description	Recommandation
Intensité d'émission de la production	Stade de la production	Pour le béton, l'acier et les produits du bois, l'intensité de production associée à différentes installations de fabrication peut varier considérablement. Pour l'acier, cela peut être très variable, car la méthode de production à partir du minerai de fer génère beaucoup plus d'émissions que la méthode utilisant de l'acier recyclé (ferraille). Les études ne définissent pas clairement leurs hypothèses et ne fournissent habituellement pas d'analyse de sensibilité de manière à pouvoir en tenir compte dans le contexte canadien. Dans de nombreux cas, les données moyennes sur le continent ou le monde sont utilisées alors que la production canadienne est souvent considérablement moins consommatrice de carbone que les moyennes mondiales (par exemple, notre approvisionnement en électricité relativement propre signifie que l'acier canadien peut être de plusieurs ordres de grandeur moins intensif en carbone que celui produit dans de nombreuses autres économies).	Les études d'ACV doivent rendre compte de manière transparente des hypothèses de production.
Hypothèses de taux de recyclage et de réutilisation des matériaux en fin de vie	Stade de la fin de vie	Les taux de recyclage et de réutilisation de l'acier peuvent être très différents d'une région à l'autre au Canada que ceux mentionnés dans la littérature, qui prend généralement en compte les moyennes globales des taux de recyclage en Amérique du Nord ou en Europe. Il faut également considérer que le taux de recyclage dépend également du type de produit d'acier recyclé (barres d'armature, poutres, plaques, fils).	Les études d'ACV doivent indiquer explicitement les taux de recyclage ou de réutilisation supposés dans la production. En se basant sur les meilleures pratiques d'ACV à l'appui des déclarations environnementales de produit (ISO 21930), les crédits pour les émissions évitées dues au recyclage et à la réutilisation en fin de vie ne doivent pas être inclus dans les ACV des matériaux de construction. Par conséquent, nous ne considérons pas la variabilité de cette variable clé dans la section d'analyse qui suit.
Conditions d'élimination	Stade de la fin de vie	Les matériaux en bois enfouis peuvent avoir des niveaux d'émissions très différents selon les paramètres opérationnels associés au site d'enfouissement récepteur (taux d'oxydation du méthane, taux de capture du méthane, utilisation ou torchage).	Les hypothèses relatives à l'exploitation des sites d'enfouissement doivent être indiquées et justifiées dans l'étude ACV.



Variables clés qui contribuent à la variabilité régionale	Stade du cycle de vie	Description	Recommandation
Variation régionale associée à l'extraction de matières premières	Stade de la production	<p>Les sources d'approvisionnement en matières premières peuvent avoir une incidence importante sur les émissions liées au transport, les besoins en énergie et les types de combustibles utilisés pour l'extraction.</p> <p>Les émissions et les puits de carbone biogénique du bois sont principalement affectés par l'effet combiné de la durée de la période de rotation des récoltes et des taux de croissance de la biomasse et de séquestration du carbone des forêts où le bois est récolté (par exemple, les taux de croissance sont fortement affectés par la latitude avec une repousse beaucoup plus lente dans les forêts septentrionales que les forêts du sud), ce qui a une incidence sur la validité de l'hypothèse de la neutralité carbone qui est la norme dans les analyses ACV. Si les forêts primaires anciennes sont exploitées, nombre d'entre elles ne pourront jamais récupérer les stocks de carbone, ce qui entraînerait des émissions importantes.</p> <p>Les émissions dues au transport des produits du bois sont principalement liées aux distances entre les sites de récolte et les usines qui, dans certaines juridictions, ont considérablement augmenté au fil du temps.</p>	<p>Les études d'ACV doivent indiquer explicitement si elles utilisent des moyennes globales à partir de bases de données existantes ou si elles utilisent des données régionales.</p> <p>Les études d'ACV ne doivent pas présumer que tous les produits du bois sont neutres en carbone et doivent suivre les émissions et les puits de carbone biogéniques. En outre, elles devraient documenter si le bois est récolté dans des forêts ayant une désignation durable certifiée (par exemple, CSA) et ne pas présumer que ce peut être le cas.</p>



4.0 Impact des incertitudes et de la variabilité régionale

L'examen des études d'ACV a identifié les principaux domaines d'incertitude et de variabilité régionale associés aux émissions de GES provenant de la construction de bâtiments utilisant différents matériaux comme le béton, l'acier et le bois sur tout leur cycle de vie. Les questions les plus pertinentes sont de savoir si les études d'ACV, telles qu'elles sont menées actuellement, fournissent une image juste et fidèle du rendement relatif de différents matériaux de construction au Canada et si des politiques favorisant la construction de bâtiments écoénergétiques et faibles en carbone peuvent être élaborées de manière fiable sur la base de ces études. Il ne fait aucun doute que l'ACV est un outil essentiel fournissant des informations importantes tant aux personnes impliquées dans la construction de bâtiments qu'aux décideurs souhaitant réduire les émissions de GES dans l'environnement bâti. Cependant, il convient de reconnaître qu'il subsiste une grande incertitude quant aux résultats et que de nombreuses hypothèses influent sur la pertinence des résultats pour supporter la planification et la conception de bâtiments au Canada.

Dans cette section, nous analysons les principales incertitudes et les variabilités régionales identifiées dans notre revue de littérature pour tenter de comprendre l'impact que ces incertitudes pourraient potentiellement avoir sur l'ensemble des travaux d'ACV existant. L'analyse ne quantifie pas de manière définitive les émissions associées au cycle de vie d'un bâtiment spécifique ni ne mène de nouvelles recherches primaires, mais s'appuie plutôt sur la littérature existante pour identifier des plages potentielles de performance en matière de GES.

4.1 Le cycle du carbone biogénique dans les produits du bois

La comptabilisation des émissions et des puits dans le cycle du carbone biogénique des produits du bois est complexe et ne peut être entreprise qu'avec des modèles de bilan de carbone sophistiqués permettant de suivre les échanges entre différents réservoirs de carbone tels que la biomasse aérienne, la biomasse souterraine, la litière, le bois mort, le sol, l'atmosphère et une gamme de produits de bois récolté. Notre examen identifie quatre problèmes importants liés aux études d'ACV existantes qui contribuent à l'incertitude quant aux émissions du cycle de vie des produits du bois utilisés dans les bâtiments :

1. Choix de la méthode d'ACV et des hypothèses comptables
2. Incertitude liée au taux de régénération après la récolte
3. Incertitude liée aux transferts de carbone entrant et sortant du réservoir de carbone du sol résultant des pratiques de gestion forestière
4. L'impact à long terme du changement climatique, de l'augmentation potentielle de la demande de produits du bois et des pratiques actuelles de gestion forestière.

Chacune de ces questions est examinée dans les différentes sous-sections ci-dessous, suivies d'une dernière sous-section qui présente une estimation des impacts potentiels sur l'ACV.

4.1.1 Méthodologie de l'ACV et hypothèses comptables

Dans son rapport d'inventaire national de 2015 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b), le gouvernement du Canada indique qu'il existe environ 226 millions d'hectares de forêts aménagées au Canada qui, grâce aux activités de gestion forestière, ont séquestré ou contribué à un puits moyen de 45 400 000 tonnes d'équivalent en dioxyde de carbone (tCO₂e) par an au cours des 20 dernières années. La séquestration du carbone



est le processus par lequel le dioxyde de carbone est puisé dans l'atmosphère par la biomasse vivante et stocké (ou séquestré). Le cycle du carbone est complexe, car le carbone se déplace entre différents réservoirs (biomasse aérienne, biomasse souterraine, bois mort, litière et matière organique du sol) et peut être rejeté dans l'atmosphère lorsque le bois est brûlé ou se décompose au cours d'un processus pouvant prendre plusieurs années. **Le degré d'incertitude dans ces calculs ne peut être sous-estimé.**

L'incertitude associée aux émissions liées aux terres forestières aménagées est estimée et rapportée dans le rapport d'inventaire national (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b) à +/- 44 %. Il s'agit du principal facteur d'incertitude pour toutes les sources / puits d'émission inclus dans l'inventaire.

Du point de vue des émissions de GES, les résultats de l'inventaire de 2015 suggèrent que le niveau d'exploitation actuel est durable, comme l'indique le fait que la catégorie de sources d'émissions / puits de l'inventaire a signalé des puits de carbone pour chaque année depuis 1990. En théorie, cela est conforme à l'idée qui sous-tend la pratique courante dans l'analyse des ACV de ne pas prendre en compte le carbone biogénique mais de simplement supposer que tout le carbone récolté est remplacé de manière durable (c'est-à-dire 1 pour 1) par une nouvelle croissance de la forêt (GLOBE Advisors, 2017; Ochsendorf et al., 2011; Robertson et al., 2012; Salazar et Meil, 2009). En fait, les études d'ACV ont été conduites pendant de nombreuses années sur ce principe, en s'appuyant sur les directives de comptabilisation du carbone établies par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2006). Cette hypothèse assume que le carbone total extrait de la réserve de biomasse vivante résultant de la récolte de bois sera éventuellement séquestré à nouveau dans des forêts gérées dans la même juridiction. Cela suppose également que le solde net des autres bassins de biomasse de la région récoltée, tels que la litière, le bois mort et le carbone du sol, est équilibré.

La récente directive ISO 21930 indique que, si le bois provient d'une ressource renouvelable provenant d'une forêt gérée de manière durable, on peut supposer un taux d'absorption de carbone de $-1 \text{ kgCO}_2\text{e} / \text{kgCO}_2$ de flux de carbone biogénique lorsqu'il pénètre dans le système. Cela fonctionne essentiellement comme un crédit jusqu'à ce que le carbone biogénique soit converti en partie ou en totalité en émissions résultant de la combustion ou de la biodégradation. La directive s'applique aux produits du bois « issus de sources responsables » et certifiés conformes aux normes de l'Association canadienne de normalisation (CSA), du Forest Stewardship Council (FSC) et de l'Initiative de foresterie durable (SFI), ou à d'autres normes approuvées à l'échelle mondiale par le Programme de reconnaissance des certifications forestières de l'organisme PEFC International. ISO 21930 indique également que le concept de forêts gérées de manière durable ne se limite pas aux systèmes de recertification, mais devrait inclure d'autres éléments de preuve, tels que les rapports nationaux en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), qui peuvent être utilisés pour identifier les forêts aux bassins de carbone forestier stables ou en augmentation. Au Canada, ce postulat de neutralité des produits forestiers s'appuie sur la certification indépendante de 168 millions d'hectares de forêts gérées par la CSA ou d'autres organismes agréés par PEFC, ce qui représente près des trois quarts des forêts gérées du pays.

Au fil des années, cette idée selon laquelle tout le bois récolté peut être considéré comme neutre en carbone s'il provient d'une source exploitée de façon durable a été contestée et démontrée incorrecte (Achat et al., 2015; Agostini, Giuntoli et Boulamanti, 2014; Holtzmark, 2012). Un des arguments en faveur de l'adoption d'une approche neutre en carbone dans l'ACV est que la gestion forestière est conduite de manière à maximiser le bois commercialisable pour la récolte, ce qui équivaut à maximiser la croissance à court terme de la biomasse aérienne, en limitant les pertes dues aux perturbations naturelles et en séquestrant du carbone dans les produits de bois récolté de longue durée (PBR LD). Certaines études ont montré que les pratiques de gestion favorisant des fréquences de récolte plus faibles et une rétention structurelle plus élevée séquestraient plus de carbone que les pratiques intensives plus courantes (Bell et al., 2017). D'autres études suggèrent que les jeunes forêts (qu'il s'agisse de forêts suivant une coupe forestière ou des perturbations naturelles) sont très souvent des sources notables de



dioxyde de carbone car la création de nouvelles forêts fait souvent suite à des émissions de GES associées à des perturbations du sol et de la végétation existante qui surpassent la production primaire nette de la repousse (Bell et al., 2017). Quoiqu'il en soit, il n'est pas clair si les pratiques actuelles sont alignées sur les objectifs de séquestration du carbone à long terme et, plus important encore, on ne doit pas supposer que le FSC et d'autres systèmes de certification durables traitent de manière appropriée la gestion du carbone dans les forêts certifiées.

Étant donné que la gestion forestière peut agir de différentes manières pour améliorer la séquestration du carbone, il est important de considérer différentes activités de gestion forestière susceptibles d'accroître les puits de carbone, y compris une exploitation forestière à rotation plus longue ou la décision de ne pas récolter en réponse au changement climatique. Ces actions fonctionnent essentiellement de la même façon que celles des fabricants d'acier et de béton qui adaptent leurs pratiques de fabrication afin de réduire les émissions au stade de production de leurs matériaux.

Face au défi selon lequel la biomasse ne doit pas toujours être considérée comme neutre en carbone, les méthodologies récentes d'ACV ont développé un indicateur permettant d'évaluer le potentiel de réchauffement planétaire du dioxyde de carbone biogénique (GWP_{bio}). Alors que l'hypothèse de neutralité carbone est essentiellement la même que celle d'un GWP égal à zéro, ces études prennent en compte les modèles de croissance de la forêt et les effets de forçage radiatif sur la durée de vie des émissions et des puits (Holtsmark, 2015). Ceci est particulièrement important pour le bois utilisé pour la production d'énergie qui libère du dioxyde de carbone immédiatement (et qui ne sera pas récupéré avant des décennies ou plus), entraînant une augmentation temporaire du dioxyde de carbone atmosphérique, et donc une augmentation du forçage radiatif et du réchauffement de la planète. L'effet est considérablement moins important pour les produits du bois utilisés dans les bâtiments qui stockent le carbone pendant une longue durée (c'est-à-dire au moins le temps nécessaire pour rétablir complètement les pertes de carbone dues à la récolte et la production de produits de bois). Il faut toutefois noter que la fabrication de ces produits utilise une bioénergie importante au Canada et que la quantité de bois ou de carbone stockée dans des produits de bois récoltés à long terme, tels que le bois d'œuvre, représente généralement un très faible pourcentage (aussi peu que 15 % selon GLOBE Advisors [2017]) de l'ensemble du bois ou du carbone qui a été retiré de la forêt.

Des études ont également montré que, même si les forêts ont une régénération suffisante pour remplacer le carbone perdu et que le taux de remplacement du carbone est suffisamment rapide pour éviter toute émission nette ou contribution au forçage radiatif global et au réchauffement climatique, il n'est pas raisonnable de supposer que les produits du bois n'ont pas d'émissions intrinsèques liées au carbone biogénique (Ter-Mikaelian, Colombo et Chen, 2015).

4.1.2 Taux de régénération des forêts aménagées

De plus en plus d'études suggèrent également que les forêts du Canada ne sont pas toutes gérées de manière durable du point de vue du carbone (GLOBE Advisors, 2017). Les approches réglementaires actuelles régissant la gestion des forêts par les provinces et les territoires datent généralement de plusieurs décennies et n'ont pas été conçues avec cet objectif en tête. De même, les principaux systèmes de certification de gestion durable des forêts ne traitent pas spécifiquement du carbone (Conseil national pour l'amélioration de l'air et des cours d'eau, Inc., 2013). Les forêts gérées dans le cadre du PEFC et les systèmes de gestion durable des forêts de la CSA ont été critiqués pour leur protection insuffisante des forêts aménagées, et les taux de régénération de certaines forêts sont inférieurs aux 100 % requis par la loi (Axelrod, 2017). La conversion des forêts primaires anciennes en forêts jeunes, qui se produit dans le cadre de tous les systèmes de réglementation et de certification disponibles, est particulièrement préoccupante, tout comme la perte permanente de capital carbone que cela peut entraîner. Les estimations varient, mais selon les essences récoltées, les méthodes de récolte, la rotation de la gestion forestière et les pratiques, les simulations estiment que 40 % seulement du carbone initialement récolté dans un peuplement mature pourrait être réabsorbé par la croissance des arbres (GLOBE Advisors, 2017). De plus, ces impacts sont exacerbés par les pertes temporaires et permanentes de terres forestières résultant de la conversion des terres en routes d'accès et zones



d'exploitation. Cela se traduit par un très grand rejet d'émissions qui ne sont jamais récupérées dans le cadre de la gestion forestière et qui ne sont pas actuellement prises en compte dans les ACV.

4.1.3 Réservoir de carbone du sol

La majeure partie du carbone dans les forêts aménagées du Canada est stockée dans les sols. Selon les estimations, entre 65 % et 95 % du carbone forestier est stocké dans le sol (Bell et al., 2017, p. 16; Bradshaw & Warkentin, 2015; Lal, 2005). Les impacts à long terme de la gestion forestière sur le carbone organique des sols ne sont pas clairs (Achat et al., 2015) et les émissions de carbone des sols peuvent être sous-estimées (Buchholz et al., 2014; GLOBE Advisors, 2017). Il a été démontré que les pratiques de récolte ont un impact significatif sur les stocks de carbone dans le sol à long terme à partir duquel des émissions nettes se produisent dans certaines conditions. Les pratiques de coupe à blanc représentent le modèle forestier prédominant au Canada et dans le monde, exposant le carbone organique du sol à la lumière du soleil, et la construction de chemins forestiers, ont tous deux un impact particulièrement néfaste sur le stockage de carbone dans le sol. La plupart des ACV des produits du bois qui considèrent les puits et les émissions de carbone biogéniques supposent que les stocks de carbone des sols restent constants dans le temps. En raison de la difficulté à assurer un suivi, il est difficile de déterminer dans quelle mesure différentes pratiques de gestion forestière peuvent être nuisibles au carbone du sol. Des études suggèrent que la récolte intensive de tiges d'arbres et de résidus de coupe peut réduire considérablement le carbone du sol. Une revue de 75 publications réalisée par Nave et al. (2010) a constaté que l'exploitation forestière entraînait une diminution significative de 8 % du carbone total du sol en moyenne dans les sols forestiers tempérés, et une méta-analyse de données recueillies dans 112 publications portant sur la dynamique du carbone a révélé que le carbone du sol diminue en moyenne de 11 % après la récolte (James & Harrison, 2016). En raison de la taille du réservoir de carbone du sol, même si les pratiques de récolte entraînent une légère diminution du carbone du sol qui est réabsorbé par les sols dans un laps de temps relativement court, les impacts peuvent être importants, en raison des vastes zones concernées.

4.1.4 Durabilité à long terme des forêts aménagées

La santé à long terme des forêts et l'incertitude des effets à long terme de l'exploitation sur la dynamique du carbone suscitent des préoccupations. La coupe à blanc représente près de 90 % des activités forestières au Canada (Grant et al., 2010), et ce type de pratique qui élimine la majeure partie de la biomasse aérienne peut réduire considérablement les nutriments nécessaires à la régénération du sol, contribuant à la perte de carbone à long terme. Les changements climatiques sont également un élément très préoccupant pouvant affecter la santé des forêts canadiennes. La hausse des températures, la modification des débits des cours d'eau, ainsi que l'augmentation des ravageurs et des maladies menacent la capacité des forêts primaires et des forêts aménagées à se régénérer. Ces stress peuvent empêcher de nombreuses zones de gestion forestière au Canada de maintenir le taux de séquestration du carbone présumé et peuvent même contribuer aux émissions nettes des forêts canadiennes (GLOBE Advisors, 2017). À titre d'exemple, une étude récente modélisant les changements de végétation induits par le climat en Alberta a conclu qu'au cours du siècle prochain, environ la moitié de la forêt boréale de l'Alberta pourrait être détruite par les incendies (Stralberg et al., 2018). Ces changements climatiques remettent en question l'idée que les pratiques de gestion forestière existantes sont suffisantes pour assurer la durabilité de l'industrie forestière.

D'autres facteurs climatiques liés à la gestion forestière sont rarement inclus dans les études d'ACV mais peuvent avoir des effets importants, notamment l'albédo du paysage, l'évapotranspiration, les aérosols, le carbone noir et le potentiel d'augmentation des taux de croissance de la forêt en raison de l'effet de fertilisation du carbone. À de nombreux égards, l'impact de ces facteurs climatiques peut être d'une ampleur similaire à celui du carbone biogénique (Agostini, Giuntoli, & Boulamanti, 2014) et une meilleure compréhension de la façon dont ces facteurs influent sur le climat est nécessaire.



Au Canada, on s'attend à un accroissement de la concurrence et de la demande pour le bois et les produits du bois destinés à la bioénergie, en tant que matière première pour les biocarburants, pour les produits de bois récolté de courte durée tels que le papier et le carton et pour les produits de bois récolté de longue durée utilisés dans la construction. L'augmentation de la demande se traduira probablement par une intensification de la production dans les zones existantes, mais aussi, dans une large mesure, par l'exploitation de forêts primaires jamais exploitées auparavant et, dans une moindre mesure, par la conversion de forêts naturelles ou non aménagées en forêts aménagées. Tel qu'indiqué précédemment, de nombreuses études ont démontré que la conversion de forêts non aménagées entraîne une perte de carbone qui ne sera jamais récupérée. De plus, il existe des risques accrus pour l'habitat des espèces et la biodiversité. De nombreux scientifiques ont préconisé une augmentation significative de la superficie des forêts protégées pour faire face à ces menaces et protéger les stocks de carbone à long terme.

Des études d'ACV consécutives et des modélisations devraient être menées pour déterminer les effets des scénarios d'augmentation de la demande en bois sur l'approvisionnement durable en bois et sur le solde des émissions et des puits de carbone. L'ACV consécutive fournit des informations sur les conséquences des modifications du niveau de production (consommation et élimination d'un produit, y compris ses effets à l'intérieur et à l'extérieur du cycle de vie du produit).² Le choix du scénario de référence à partir duquel devront être mesurées les émissions nettes ou des puits est fondamental et peut conduire à des émissions de cycle de vie radicalement différentes pour les produits de construction en béton, en acier et en bois.

Perturbations naturelles

Les perturbations naturelles comprennent les incendies de forêt, les insectes, les maladies et les dommages causés par les intempéries. Ces importantes variations interannuelles des émissions sont désormais identifiées séparément dans l'inventaire national des variations des stocks de carbone liées à la gestion des forêts afin de mieux représenter les émissions et les absorptions contrôlées par l'homme dans les forêts aménagées. L'exclusion des perturbations naturelles permet d'isoler les impacts anthropiques liés aux pratiques de gestion forestière de ceux liés aux facteurs naturels.

Il existe un débat considérable sur la manière dont les perturbations naturelles et les pratiques de gestion des forêts devraient être traitées dans la comptabilité des inventaires nationaux (Lee & Sanz, 2017; CCNUCC, 2011). D'une part, il est reconnu que les cas de force majeure ne peuvent souvent pas être contrôlés et que le fardeau de ces émissions ne doit pas nécessairement être imputé à la gestion forestière. D'autre part, de nombreux experts ont identifié que cette exclusion des perturbations naturelles entraîne une comptabilité asymétrique qui peut gonfler les puits de carbone attribués à la gestion forestière (UNFCCC, 2011) et que, idéalement, toutes les activités forestières devraient être incluses afin de fournir des signaux appropriés pour atteindre des niveaux plus élevés de séquestration du carbone dans le secteur de l'utilisation du territoire. Les méthodologies permettant de déterminer la meilleure façon d'exclure les perturbations naturelles qui échappent au contrôle humain et se produisent sur les terres gérées continuent d'évoluer, mais il reste à savoir s'il est juste d'attribuer aux forêts gérées le plein crédit des puits de carbone résultant d'un processus naturel de régénération des forêts, mais à ne pas reconnaître dans le même registre toutes les émissions pouvant résulter de perturbations naturelles.

Pour avoir une idée des changements réels apportés aux stocks de carbone dans les forêts aménagées du Canada, il est nécessaire d'inclure les perturbations naturelles. La figure 3 indique les émissions nettes des perturbations naturelles, représentant les variations nettes réelles des stocks de carbone provenant de forêts aménagées au Canada.

² Un exemple de son application est l'évaluation de l'éthanol à base de maïs aux États-Unis (Searchinger et al., 2008). Dans cet exemple, l'ACV attributionnelle indiquait que les réductions d'émissions associées à l'éthanol à base de maïs seraient de 20 % inférieures à celles de l'essence, mais une ACV consécutive qui tenait compte de l'augmentation de la demande prévoyait une augmentation de 47 % des émissions par rapport à l'essence en raison des changements de l'utilisation des sols induits par la hausse des prix du maïs, du soja et d'autres céréales.

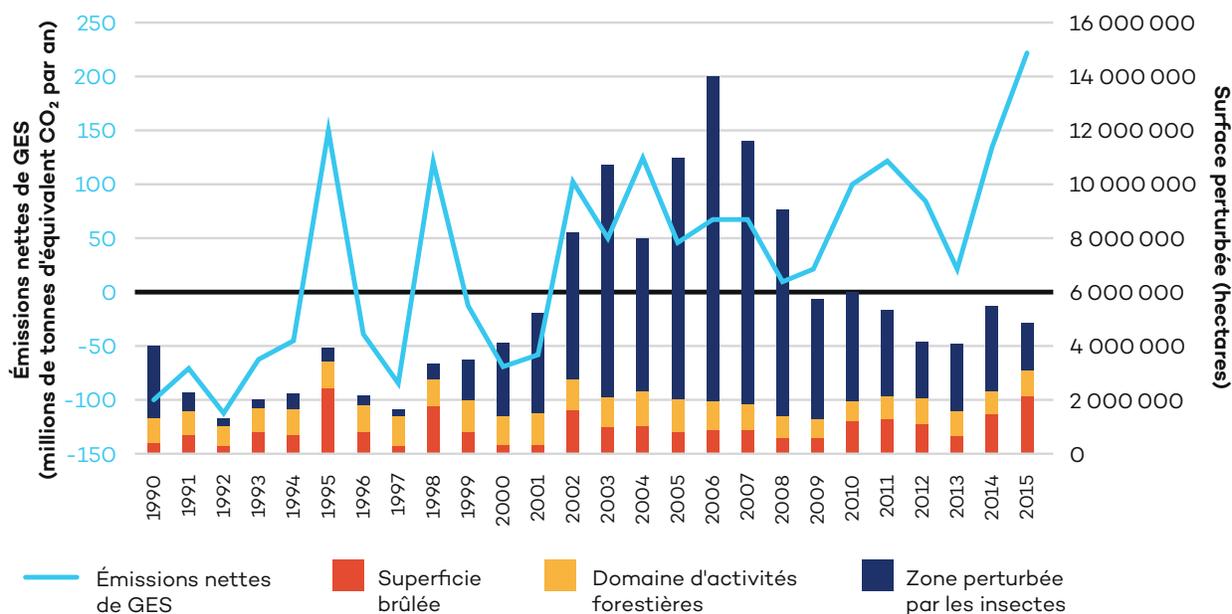


Figure 3. Émissions nettes des forêts aménagées au Canada (1990-2015)

Source : *Environnement et Changement climatique Canada*

Les émissions nettes des 20 dernières années, indiquées par la ligne bleu clair sur la figure 3, représentent une moyenne de 50 100 000 tCO₂e par an. Bien que les projections futures sur les émissions et les puits des forêts gérées sont intrinsèquement incertaines en raison de la difficulté à modéliser les perturbations naturelles et les boucles de rétroaction du changement climatique, une analyse intégrée complète du potentiel d'atténuation des changements climatiques dans les forêts aménagées du Canada a été complétée par Smyth et al. (2014). Les émissions nettes devraient augmenter de manière significative au cours des 30 prochaines années, avec des émissions nettes moyennes proches de 100 000 000 tCO₂e par an sur cette période. Ces projections sont expliquées par une plus grande ampleur anticipée des perturbations naturelles. Les effets du changement climatique, y compris les changements de température, les précipitations et la durée des saisons sont cités comme les principaux facteurs d'augmentation des perturbations naturelles (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b).

La relation réelle entre les perturbations naturelles et les pratiques de gestion forestière est complexe. Les pratiques de gestion forestière influencent les perturbations naturelles; par exemple, le risque d'incendie de forêt et son intensité peuvent être exacerbés par certaines pratiques de gestion forestière. De nombreux aspects de la gestion forestière visant à réduire les pertes de peuplements sont susceptibles de contribuer à réduire les pertes dues à ces perturbations, du moins compte tenu des pratiques et des taux de récolte actuels.

Les décideurs et les praticiens de l'ACV doivent comprendre que l'utilisation des produits du bois n'est pas intrinsèquement durable et que la comptabilisation du carbone biogénique est extrêmement complexe et comporte un degré élevé d'incertitude. Les émissions et les puits de carbone sont régis par une multitude de pratiques d'aménagement forestier différentes dans une gamme très diversifiée de forêts et de conditions à l'échelle du pays. Ce système complexe est aujourd'hui menacé par des perturbations accrues dues au changement climatique. Une comptabilisation représentative du carbone pour les produits du bois doit inclure toutes les émissions en même temps que le carbone net séquestré; autrement, nous pourrions élaborer des politiques inconséquentes.



4.2 Analyse de sensibilité

Une étude détaillée de l'impact potentiel global des incertitudes associées au carbone biogénique sur les forêts canadiennes serait une entreprise complexe, étant donné que les pratiques de gestion forestière sont uniques à chaque peuplement forestier et que de nombreux facteurs complexes contribuent aux échanges de carbone entre l'atmosphère et les différents réservoirs de carbone.

La modélisation de ces incertitudes et scénarios pouvant optimiser la séquestration du carbone doit incomber aux institutions nationales et provinciales responsables de la gestion et de la protection des forêts.

Cet examen adopte une approche simple du bilan de masse pour tester la sensibilité des différentes incertitudes liées aux émissions et aux puits de carbone biogénique par rapport au niveau de référence neutre en carbone qui est largement adopté dans les études d'ACV et qui reflète un transfert net de carbone biogénique dans l'atmosphère et un forçage radiatif cumulé égal à zéro sur la durée de vie du produit de bois récolté (Conseil national pour l'amélioration de l'air et des cours d'eau, Inc., 2013). Les échanges de carbone entre les réserves forestières, les produits de bois récoltés et l'atmosphère font l'objet d'un suivi annuel et prennent en compte une rotation des récoltes de 60 ans sur une période d'évaluation de 100 ans. La sélection d'une période de rotation plus courte augmenterait les émissions nettes estimées, alors qu'une période de rotation des récoltes plus longue réduirait les émissions nettes. L'analyse n'est pas représentative d'une forêt ou d'une région particulière, mais le but est de tester les scénarios suivants. Les scénarios 1, 2 et 3 sont isolés et indépendants les uns des autres, tandis que le scénario 4 combine l'impact des trois scénarios (1, 2 et 3) :

1. Suppose que le taux de régénération d'une forêt actuellement certifiée par le groupe CSA et déclaré supérieur ou égal à 100 % soit surestimé et s'établisse en fait à seulement 90 % en raison de pratiques de gestion de régénération forestière insuffisantes.
2. Envisage un résultat pour une forêt boréale où il y a une perte nette de 5 % de carbone dans le sol, attribuée à la coupe à blanc.
3. Envisage la conversion d'une forêt naturelle avec un peuplement mature en une forêt gérée avec de courtes rotations afin de maximiser les rendements (perte de 40 % du carbone total en surface).
4. Impacts combinés des scénarios 1, 2 et 3.

Les scénarios ont été élaborés à l'aide de valeurs dérivées de la littérature scientifique décrite précédemment. Toutefois, le scénario de base et les quatre scénarios alternatifs ont été conçus pour donner un aperçu d'une gamme d'impacts possibles en raison des incertitudes identifiées, mais ne représentent pas des résultats probabilistes, ni des conditions moyennes ou spécifiques pour les forêts aménagées du Canada. Des recherches et modélisations régionales supplémentaires seraient nécessaires pour déterminer la probabilité de ces impacts. Des calculs détaillés et des hypothèses relatives à chacun des quatre scénarios alternatifs sont fournis à l'annexe B.

Les facteurs GWP_{bio} sur 100 ans³ ont été calculés pour l'analyse de l'ACV et sont présentés dans le tableau 5.

Des facteurs de GWP_{bio} distincts pourraient être calculés pour les produits de bois récoltés de courte et longue durée de vie; cependant, la moyenne est utilisée car elle peut être appliquée à la fois au carbone incorporé dans les éléments de construction en bois et à la bioénergie utilisée pour fabriquer ces produits. Leur combinaison témoigne également du fait qu'ils sont rarement substituables. Par exemple, du bois transporté jusqu'à la scierie, environ la moitié seulement est convertie en produits de bois récoltés de longue durée (GLOBE Advisors, 2017).

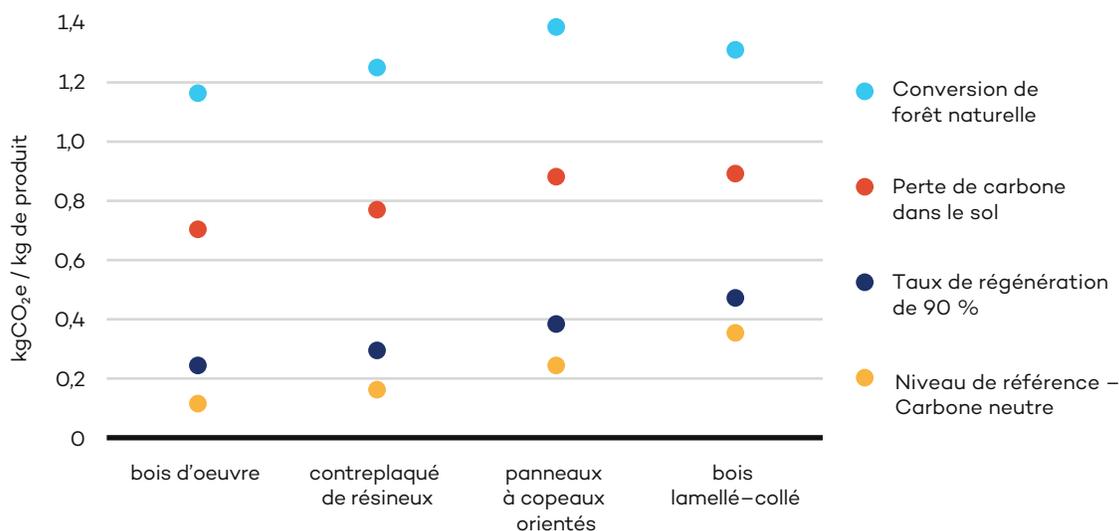
³ Le GWP_{bio} est une mesure qui peut être utilisée pour évaluer le potentiel de réchauffement planétaire du dioxyde de carbone biogénique. Un facteur de zéro indiquerait que le carbone biogénique ne contribuerait à aucune émission nette (carbone neutre) et n'augmenterait ni ne diminuerait le forçage radiatif sur une certaine période. Un facteur de 1 indiquerait un forçage radiatif équivalent aux émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de combustibles fossiles.

**Tableau 5. Facteurs GWP_{bio} estimés pour quatre scénarios de carbone biogénique**

Scénario	GWP_{bio}
Niveau de référence - Carbone neutre	0
Taux de régénération de 90 % (scénario 1)	0,0625
Perte de carbone dans le sol (scénario 2)	0,286
Conversion de forêt naturelle (scénario 3)	0,509
Scénario combiné (scénario 4)	0,835

Les facteurs GWP_{bio} ont été calculés à l'aide de modèles de croissance de la forêt plus sophistiqués et un large éventail de résultats est présenté. Une étude récente examinant les effets de différentes périodes de rotation des récoltes et différents pourcentages de produits de longue durée par rapport aux produits de courte durée (Liu et al., 2017) ont indiqué une plage de GWP_{bio} allant de 0,13 à 0,32. Plus la période de rotation est longue et plus la proportion de produits de bois de courte durée est importante, plus le facteur GWP_{bio} relatif est important.

En utilisant les résultats publiés par l'Athena Sustainable Materials Institute concernant les émissions intrinsèques pendant le cycle de vie (du berceau au départ de l'usine) pour différents produits de bois, y compris le bois d'œuvre, le revêtement de contreplaqué, les panneaux de particules OBS et le lamellé collé, les émissions ont augmenté par un facteur allant de 1,3 à 10, dépendamment des hypothèses et du produit. La figure 4 identifie les changements dans les émissions intrinsèques estimées pour ces produits du bois et pour les trois scénarios décrits ci-dessus.

**Figure 4. Émissions de GES au cours d'un cycle de vie berceau-à-l'usine de quatre produits de bois selon différentes hypothèses**

Remarque : Les données de base proviennent d'études d'évaluation du cycle de vie préparées par Athena Sustainable Materials Institute.

Une étude de Morrison Hershfield a été choisie (Morrison Hershfield, Dakota du Nord) a été choisie afin de comparer les impacts sur l'ensemble du cycle de vie d'un immeuble résidentiel selon deux types de construction. Cette ACV estimait les résultats pour l'ensemble du bâtiment entre deux versions de cadre structurel, l'une en bois et l'autre en béton, qui avaient des besoins en énergie équivalents. Cet exemple est typique des travaux d'ACV trouvés dans la littérature et estime que les émissions du cycle de vie du berceau à la porte (entre la fabrication et le départ de l'usine) pour une construction en bois donnée ont un potentiel de réchauffement planétaire inférieur de



36 % à celui d'une construction en béton. L'étude suppose que les émissions de carbone biogénique sont neutres en carbone et ne contribuent pas au potentiel de réchauffement de la planète. Les trois principaux éléments de construction en bois inclus dans ce bâtiment sont les sections en bois lamellé-collé, les panneaux à copeaux orientés et le bois d'œuvre. Sur la base de la masse totale de ces matériaux, de l'intensité d'émission calculée et des facteurs d'émission de carbone biogénique associés à chaque scénario, les émissions supplémentaires de carbone biogénique du bâtiment en béton et en bois peuvent être calculées. La figure 5 présente la comparaison des émissions du berceau à la porte par rapport au scénario de référence.

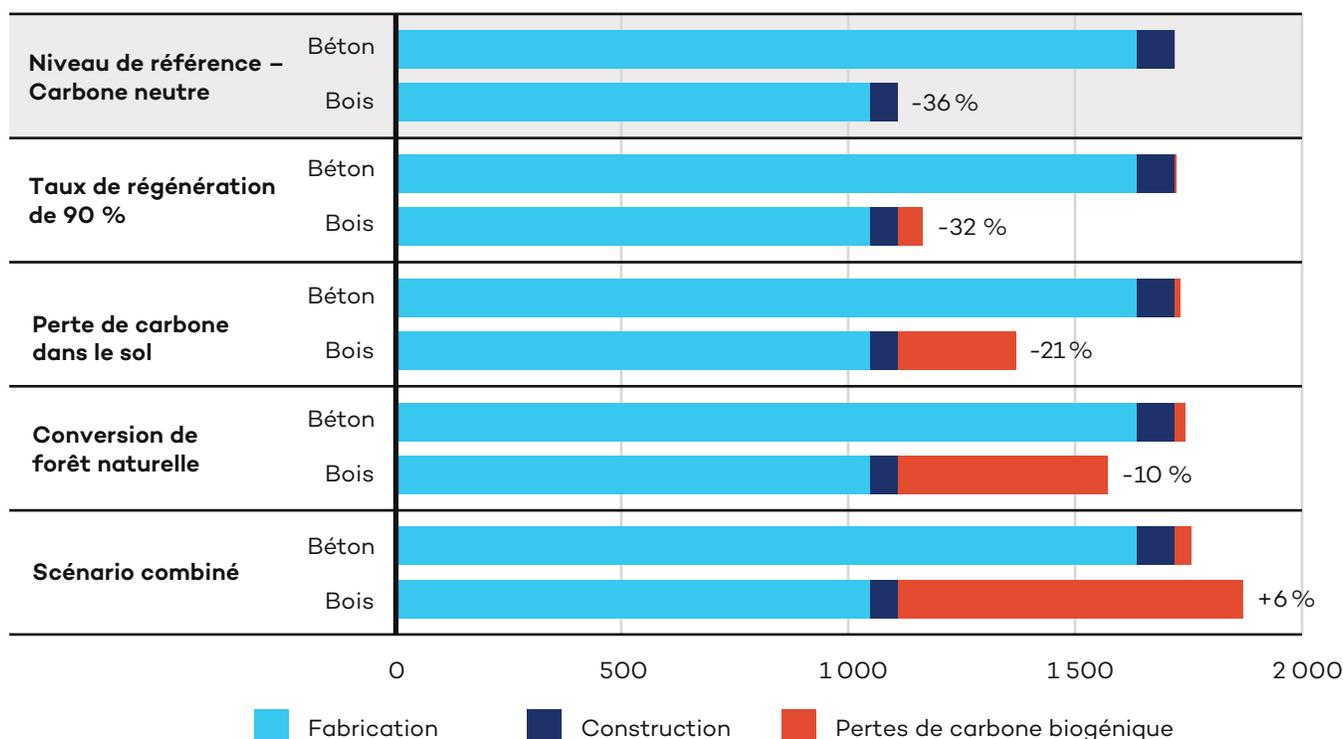


Figure 5. Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment : construction en bois et en béton prenant en compte quatre scénarios de gestion forestière différents

Remarque : L'unité fonctionnelle est l'ensemble du bâtiment, basée sur une conception de bâtiment en béton et en bois ayant une efficacité opérationnelle et de service similaires.

Étant donné qu'en général, les émissions au stade de l'utilisation prédominent, les impacts relatifs entre le scénario de base et les quatre différents scénarios de gestion forestière sont beaucoup plus faibles que ceux indiqués dans la Figure 5, qui ne prend en compte que les émissions du berceau à la porte. La figure 6 présente la différence relative entre le bâtiment en bois et celui en béton dans ces scénarios pour une gamme d'émissions possibles du stade d'utilisation et représente une ACV de l'ensemble du bâtiment. La construction d'un immeuble résidentiel en bois et en béton de hauteur moyenne à Québec, réalisée par Morrison Hershfield, fait état de très fortes émissions au stade de l'utilisation (environ 95 % des émissions totales du berceau à la porte et du stade de l'utilisation), représentées par l'extrémité de la plage d'impact pour les bâtiments typiques au Canada identifiés dans la figure. Les impacts relatifs sont plus importants si la proportion des émissions d'utilisation est plus élevée, comme cela se produirait sous des climats plus modérés dans des bâtiments à efficacité énergétique supérieure et des bâtiments à durée de vie opérationnelle inférieure. En moyenne, les émissions résultant de l'utilisation des bâtiments par rapport aux émissions totales du cycle de vie ont été déterminées par la littérature à environ 80 %.

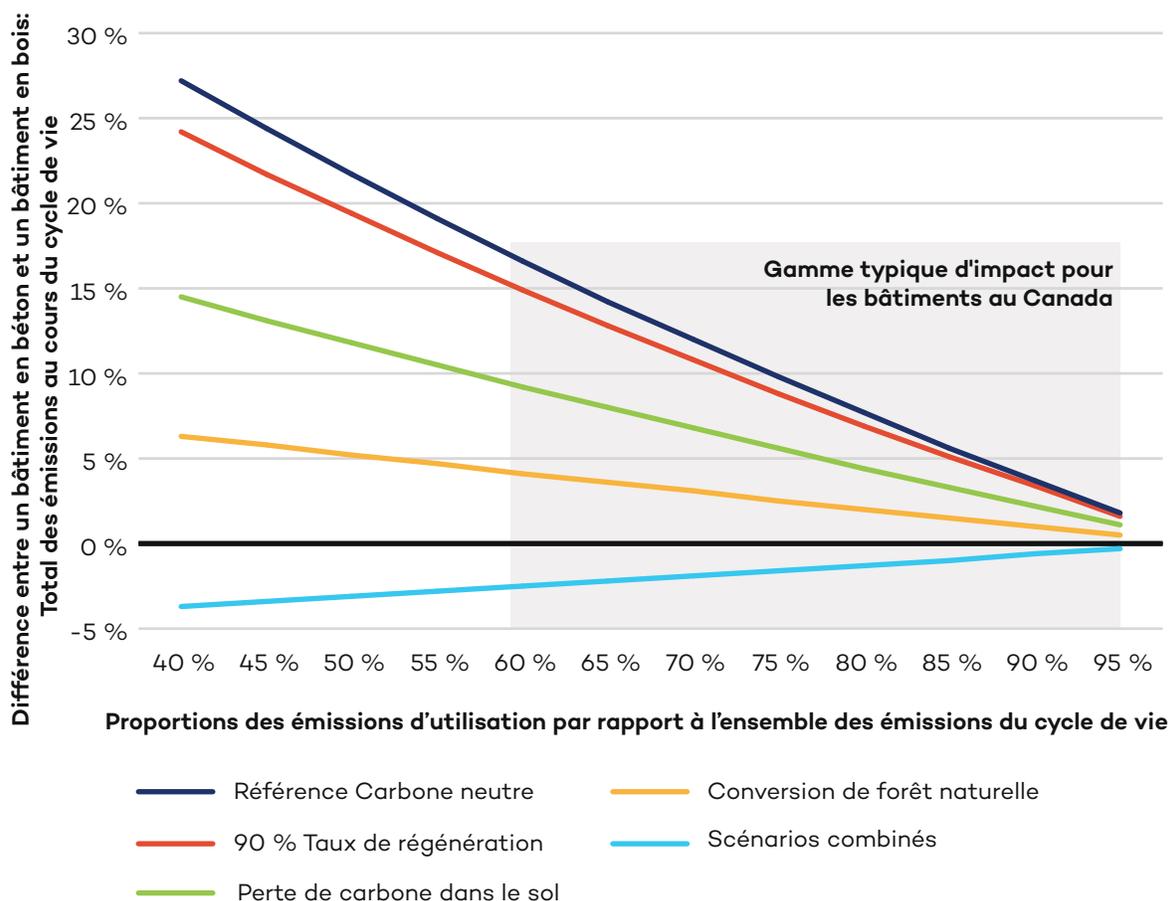


Figure 6. Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, du berceau à la porte et au stade de l'utilisation, pour une gamme d'émissions d'utilisation et selon quatre scénarios de gestion forestière

Remarque : L'unité fonctionnelle est l'ensemble du bâtiment, basée sur une conception de bâtiment en béton et en bois ayant une efficacité opérationnelle et des services similaires.

La discussion et l'analyse présentées dans cette section remettent en question la validité de l'affirmation selon laquelle l'analyse ACV d'un bâtiment peut sans risque présumer que les produits du bois au Canada sont neutres en carbone. Bien que l'analyse ne puisse fournir une détermination de la probabilité générale de ce type d'impact pour un produit de construction en bois certifié de source durable au Canada, elle indique que les émissions des produits du bois sur l'ensemble du cycle de vie sont considérablement plus élevées que celles présentées dans la littérature. **Une étude détaillée et une modélisation seraient nécessaires pour étudier des régions spécifiques et des forêts aménagées au Canada et pour prendre en compte les effets cumulatifs du forçage radiatif de plusieurs cycles de récolte.**

4.2.1 Carbonatation à long terme du béton

Pour fabriquer du béton, des émissions importantes de dioxyde de carbone sont libérées lors de la production de ciment par une réaction chimique appelée calcination. Le processus de calcination libère environ 526 kg de CO₂ / t de clinker lors de la production (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b). Pendant toute la durée de vie du béton, le dioxyde de carbone est lentement réabsorbé par le biais d'un processus inverse à la



réaction de calcination, appelé carbonatation. La limite théorique est que presque tout le dioxyde de carbone libéré lors de la calcination peut éventuellement être réabsorbé; cependant, dans les applications typiques du béton dans les bâtiments, la fraction qui est réabsorbée pendant la durée de vie du bâtiment est petite et la quantité absorbée à la fin de la vie dépend de manière significative des conditions d'élimination. La quantité maximale de dioxyde de carbone que le béton peut lier ou séquestrer varie en fonction d'un grand nombre de facteurs, mais se situe généralement entre 30 et 90 % (Andersson, Fridh, Stripple et Häglund, 2013). Au niveau mondial, on estime que la carbonatation des matériaux à base de ciment représente un puits de dioxyde de carbone de plus en plus important et croissant. Selon une estimation, une quantité cumulée de 4,5 GtC aurait été séquestrée dans les matériaux de ciment carbonatés de 1930 à 2013, compensant ainsi 43 % des émissions de dioxyde de carbone provenant de la production de ciment au cours de la même période (Xi et al., 2016).

Les effets de la carbonatation n'ont généralement pas été pris en compte dans les études d'ACV. Les récentes directives, y compris ISO 21930 (2017), préconisent l'inclusion et l'estimation de la carbonatation aux stades de l'utilisation et de fin de vie.

La dimension temporelle de la carbonatation et du traitement du béton en fin de vie est extrêmement importante. Pendant une durée de vie typique d'un bâtiment (60 à 100 ans), on estime que la carbonatation est très petite, de 1 à 2 % (Andersson et al., 2013; Collins, 2009). Cela s'explique par le fait que la carbonatation dans les structures en béton existantes est étroitement liée au rapport surface / volume exposé du béton et à la profondeur de carbonatation associée. Dans la plupart des applications, seuls les premiers millimètres de la surface de béton exposée sont fortement carbonatés, même pendant toute la durée de vie d'un bâtiment. La majorité des processus de carbonatation pour le béton se produisent généralement en fin de vie, en particulier si le béton est concassé et brisé en fragments de plus grande surface pouvant réagir au dioxyde de carbone. Plus les fragments sont petits et plus l'exposition directe à l'atmosphère est directe, plus le taux de carbonatation est élevé.

Le béton est typiquement utilisé en fin de vie comme matériau de remblayage, par exemple pour la protection de remblai ou comme soubassement pour les chaussées. Certaines quantités de béton sont bien sûr encore enfouies. Des études indiquent que jusqu'à 80 % des émissions de calcination totales pourraient être réabsorbées au cours des 20 premières années avec un système de gestion en fin de vie qui optimise le degré de fragmentation et l'exposition des fragments à l'atmosphère; la pratique courante, cependant, privilégie l'utilisation du béton comme matériau de base faiblement exposé à l'air, aurait des taux de carbonatation beaucoup plus bas. Des estimations de 11 à 20 % sur une période de fin de vie de 20 ans fondées sur les pratiques actuelles sont plus réalistes (Andersson et al., 2013; Collins, 2009).

Étant donné que les émissions de calcination représentent environ 25 à 30 % du total des émissions intrinsèques au cycle de vie du béton, du stade de la production à celui de la construction (Collins, 2009), la prise en compte de la carbonatation dans l'analyse des étapes de production et de construction du cycle de vie pourrait contribuer à une réduction totale de l'estimation des émissions de 3 à 6 % selon les pratiques actuelles. Si la gestion du béton en fin de vie était optimisée pour favoriser la carbonatation, la réduction globale pourrait atteindre 20 %. Il convient de noter que ces estimations sont surestimées, car elles ne tiennent pas compte du décalage considérable entre les émissions de production et les absorptions de dioxyde de carbone en fin de vie. Une ACV appropriée devrait prendre en compte l'impact du forçage radiatif sur les émissions de calcination et l'absorption de dioxyde de carbone par carbonatation.

Il est conseillé de prendre soin de ne pas compter deux fois la gestion en fin de vie du béton qui optimise la carbonatation lorsque celle-ci est prise en compte dans l'ACV. Seule la carbonatation pendant la phase d'utilisation et pour la pratique courante d'élimination en fin de vie (par exemple, l'enfouissement du béton sur place) devrait être considérée.



Dans ce cas, l'effet de la carbonatation ne dépasserait pas 11 à 20 % des émissions de calcination, ou 3 à 6 % des émissions totales du cycle de vie des produits en béton. En raison des incertitudes liées au potentiel d'absorption du dioxyde de carbone par carbonatation et sa durée, il est recommandé, par prudence, d'utiliser la plus faible de ces valeurs. Dans une perspective globale du cycle de vie des émissions d'un bâtiment, l'impact de cette inclusion sera très faible. Il est peu probable que les émissions incorporées d'un bâtiment soient réduites de plus de 0,5 pour cent par la carbonatation, même si une quantité importante de béton est utilisée dans un bâtiment efficace en énergie dont les émissions opérationnelles sont bien inférieures aux taux moyens.

4.3 Variabilité régionale

Le tableau 6 présente une description des variables clés qui contribuent au potentiel de variabilité régionale ou de projet des émissions du cycle de vie et estime l'ampleur de la variabilité régionale au Canada en pourcentage des émissions totales du cycle de vie du produit.

Tableau 6. Variables clés contribuant au potentiel de variabilité régionale ou de projet des émissions du cycle de vie et estimation de l'ampleur de la variabilité régionale au Canada en pourcentage des émissions totales des produits.

Variables clés contribuant à la variabilité régionale	Étape du cycle de vie	Description	Variabilité régionale au Canada en pourcentage des émissions totales des produits.
Intensité d'émission de la production	Stade de la production	Pour le béton, l'acier et les produits du bois, l'intensité de production associée à différentes installations de fabrication peut varier considérablement. Cependant, seul le processus de fabrication de l'acier est susceptible d'avoir un impact significatif sur les émissions totales des produits au cours du cycle de vie. Pour l'acier, ceci est très variable, car il existe une méthode de production à partir de minerai de fer et une méthode beaucoup moins émettrice utilisant de l'acier recyclé. En règle générale, les études ne définissent pas clairement leurs hypothèses et ne fournissent pas d'analyse de sensibilité leur permettant d'être prises en compte dans le contexte canadien. Dans de nombreux cas, les données moyennes à l'échelle du continent ou à l'échelle mondiale sont utilisées.	La production d'acier à partir du minerai de fer au Canada se traduirait par des émissions approximatives de 1,4 à 1,8 tCO ₂ e / t d'acier brut produit. L'approvisionnement en acier à l'aide de l'acier recyclé au Canada, en supposant l'utilisation de l'électricité renouvelable, entraînerait des émissions approximatives de 0,15 à 0,25 tCO ₂ e / t d'acier brut produit (Hasanbeigi, Arens et Price, 2013). Pour les produits en acier typiques tels que les cadres primaires, les cadres secondaires et les panneaux de toit / mur, les émissions liées à la première méthode peuvent représenter 60 à 80 % du total des émissions intrinsèques. De ce fait, l'approvisionnement alternatif en acier recyclé permettrait une réduction globale des émissions intrinsèques de l'ordre de 50 à 73 %. Il faut toutefois noter que certains produits en acier ne peuvent pas être fabriqués à partir de ferraille d'acier en raison d'impuretés et de problèmes de qualité.



Variables clés contribuant à la variabilité régionale	Étape du cycle de vie	Description	Variabilité régionale au Canada en pourcentage des émissions totales des produits.
Conditions d'élimination des produits du bois	Stade de la fin de vie	Les matériaux de construction en bois qui sont enfouis peuvent avoir des niveaux d'émissions très différents selon les paramètres opérationnels associés au site d'enfouissement récepteur (taux de captage du méthane, utilisation ou torchage). La plupart des études d'ACV qui prennent en compte les émissions de fin de vie des matériaux en bois envoyés aux sites d'enfouissement utilisent les caractéristiques d'élimination régionales moyennes.	L'élimination des produits de construction en bois qui maximise les émissions (pas de récupération du méthane, pas de torchage, un climat humide, un site géré avec une profondeur supérieure à 10 m et une couverture de surface fréquente) pourrait conduire à des émissions aussi élevées que 3,85 kgCO ₂ e / kg de bois (GIEC, 2006). Cependant, l'élément temporel de la décomposition doit être pris en compte, car les émissions seraient réparties sur une longue période et la demi-vie de la décomposition pourrait être supérieure à 50 ans pour certains produits du bois. Les émissions réelles sont généralement beaucoup plus faibles en raison de la récupération des gaz, du brûlage à la torche et de leur utilisation, ainsi que de la teneur en substances organiques dégradables. Avec un taux de récupération de 90 %, les émissions des produits du bois éliminés tombent à 0,39kgCO ₂ e / kg (GIEC, 2006). Selon le rapport d'inventaire national de 2017 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017b), environ 38 % des émissions de méthane générées sur tous les sites d'élimination de déchets solides municipaux en 2015 étaient brûlés ou utilisés, ou, à l'inverse, 62 % du méthane généré était libéré dans l'atmosphère. Ce taux moyen de capture a considérablement augmenté par rapport à 28 % en 2000. Toutefois, pour les produits de bois provenant d'un chantier de construction spécifique, le taux réel dépendra du site qui reçoit les déchets, puisque le taux de capture au Canada pourrait varier de près de 0 % à près de 100 %. Il est probable que les taux de captage augmentent considérablement au cours des deux prochaines décennies, à mesure que la valeur du méthane et la rigueur des politiques de tarification du carbone augmenteront.



Variables clés contribuant à la variabilité régionale	Étape du cycle de vie	Description	Variabilité régionale au Canada en pourcentage des émissions totales des produits.
Variation régionale associée à l'extraction de matières premières	Stade de la production	<p>La provenance des matières premières peut avoir un impact significatif sur les émissions. Cela a un impact sur les émissions associées au transport, les besoins en énergie et les types de combustibles utilisés pour l'extraction et, dans le cas du bois, cela pourrait signifier que l'hypothèse de la neutralité carbone est valide ou non. Les régions où la conversion des forêts naturelles est importante peuvent avoir des émissions beaucoup plus importantes.</p> <p>Pour le ciment et l'acier, les principaux facteurs de variabilité sont l'énergie utilisée pour l'extraction (électricité renouvelable par rapport aux combustibles fossiles), ainsi que la distance et l'intensité d'émission du transport des matières premières vers les sites de fabrication.</p> <p>La disponibilité de combustibles à faible teneur en carbone (biomasse issue de déchets, par exemple) pour la fabrication de ciment est également une variable régionale importante pour la détermination de l'intensité en carbone des produits en béton.</p>	Il existe de nombreux facteurs contribuant à la variation régionale et des estimations fiables ne peuvent être tirées de la littérature.



5.0 Objectifs climatiques à plus long terme

Pour rester dans des limites climatiques sûres, il sera essentiel que l'environnement bâti réduise le carbone contenu dans les matériaux utilisés, notamment l'acier, le béton et le bois. Tel qu'indiqué précédemment, l'acier et le béton produisent des émissions significatives liées à leur production, tandis que la récolte de produits de bois pourrait entraîner des rejets de carbone biogénique séquestré naturellement et une diminution des puits de carbone. Il existe actuellement de meilleures pratiques et technologies pour réduire les émissions dans tous les secteurs. Cependant, des technologies et des pratiques novatrices et révolutionnaires seront nécessaires pour atteindre les objectifs climatiques du milieu du siècle pour ces trois produits.

Si les émissions intrinsèques aux produits sont primordiales, la performance énergétique des bâtiments l'est tout autant. En raison de la sévérité accrue des codes du bâtiment et de la mise en place de la tarification du carbone au Canada, la performance énergétique et la durée de vie et de service des bâtiments joueront désormais un rôle déterminant au stade de la conception et de la sélection des matériaux.

À la lumière des objectifs climatiques du milieu du siècle et de l'influence qu'ils auront sur le secteur du bâtiment, nous examinons dans cette section les possibilités d'améliorer l'efficacité énergétique de l'environnement bâti et les opportunités à court et à long terme pour produire des matériaux de construction plus durables.

5.1 Efficacité énergétique et environnement bâti

Tel qu'indiqué précédemment, les décisions en matière de construction de bâtiments sont influencées par un certain nombre de facteurs, notamment les progrès en matière d'efficacité énergétique. Les innovations réalisées dans les produits de construction, ainsi que dans les systèmes opérationnels ou mécaniques appliqués et exploités dans les bâtiments, influenceront de plus en plus la manière dont l'énergie est consommée (et combien / quel type d'énergie), ce qui aura des incidences économiques et environnementales sur le secteur.

Dans l'optique de politiques qui monétiseront de plus en plus les émissions de GES associées à l'énergie (telles que le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques), les constructeurs rechercheront invariablement des moyens de réduire les émissions et, du même coup, leur risque économique. L'efficacité est régulièrement citée parmi les moyens les plus rentables de réduire les émissions dans le secteur du bâtiment (Agence internationale de l'énergie, 2016; Lucan et al., 2014; McKinsey & Company, 2010; Ressources naturelles Canada, 2018a).

L'efficacité énergétique est une considération dans le choix des matériaux, des options de construction et de l'opération des bâtiments, ainsi que dans les normes et réglementations appliquées au secteur de la construction. Nous examinons également d'autres avancées potentielles dans la construction de bâtiments (y compris des programmes innovants de construction écologique) qui pourraient influencer sur les décisions relatives aux matériaux de construction dans un avenir rapproché.

5.1.1 Construction

De nombreux éléments d'efficacité énergétique entrent en jeu dans les discussions sur l'enveloppe du bâtiment. Par exemple, une couverture extérieure isolante peut augmenter l'efficacité énergétique et améliorer le confort thermique et l'étanchéité à l'air dans un bâtiment (Pearl & Chen, 2017). La norme de la maison passive encourage les couvertures extérieures et est souvent utilisée là où il n'y a pas de cavités murales comme moyen efficace de gérer les fluctuations de température (Bax, Cruxent et Komornicki, n.d.). Les bâtiments en béton peuvent bénéficier de couvertures extérieures, en particulier dans les régions qui connaissent des changements de température importants au cours des différentes saisons de l'année.



Les balcons d'immeubles de hauteur moyenne et de gratte-ciel constituent une autre caractéristique externe influençant l'efficacité énergétique. La conception et la construction d'un système de balcon en porte-à-faux brisé au moyen d'un isolant rigide et de barres d'armature en fibre de verre peuvent réduire le coefficient de transmission de chaleur à travers la dalle jusqu'à 75 % et, par conséquent, la température de surface intérieure est augmentée et le contrôle de la condensation est amélioré (Pearl & Chen, 2017; The Construction Specifier, 2014). Tel qu'expliqué dans The Construction Specifier : « Une rupture de pont thermique structurelle typique est utilisée pour remplacer le béton entre le balcon extérieur et la dalle intérieure par un matériau isolant, tel que le béton haute densité à base de polystyrène expansé (EPS) renforcé par du graphite. Les ruptures thermiques préfabriquées peuvent être utilisées pour le béton à béton, l'acier à acier ou le béton à acier avec un module de rupture thermique entre un balcon externe et un cadre structurel interne » (The Construction Specifier, 2014).

Les toits constituent un autre élément extérieur essentiel pour la protection contre les intempéries, la réduction des transferts de chaleur et le maintien d'un environnement confortable dans le bâtiment. Il existe une variété de matériaux pouvant être utilisés pour la toiture. La toiture en acier, par exemple, gagne du terrain en tant que matériau de construction écologique populaire en raison de son contenu recyclé élevé et de sa durabilité. Le composite est également utilisé comme matériau alternatif, à base de plastique et de caoutchouc, conçu pour ressembler aux matériaux naturels tels que l'ardoise et le bois. En raison de leur composition en matériaux recyclables, ils sont considérés comme une option viable pour les matériaux de construction écologiques et leur énergie intrinsèque est inférieure à celle des matériaux de remplacement naturels (pierre / ardoise, par exemple) (Singh, 2014).

Ce qui se passe à l'intérieur des murs joue également un rôle dans l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Par exemple, les murs à ossature d'acier sont de bons conducteurs de chaleur, ce qui réduit considérablement la valeur R effective d'un mur. En isolant la structure de mur extérieur à ossature d'acier entre les dalles de sol en béton, le transfert de chaleur est considérablement réduit (Pearl & Chen, 2017). Le type d'isolation fait également une différence dans la valeur R des murs, où une mousse d'isolation moderne peut permettre d'importantes économies d'énergie et peut être moulée dans différentes configurations de bâtiments, réduisant ainsi les coûts énergétiques de 30 à 80 % (Bax, Cruixent et Komornicki, Dakota du Nord). Les coffrages isolés en polystyrène ou en mousse de polyuréthane, remplis de béton et agrafés de blocs ou de panneaux constituent un bon exemple. Grâce au système d'empilage ou d'interverrouillage, une quantité considérable de masse thermique et de support structurel est facilement maintenue et il s'agit d'un matériau durable doté d'une bonne longévité (Pearl & Chen, 2017; Singh, 2014). Cela a été principalement utilisé dans les normes de la maison passive, LEED et Net Zero. L'isolation peut également être réalisée avec des matériaux bruts / bio, tels que la paille. La paille peut être mélangée à du béton ou à de la boue, ce qui peut également résister au feu, à la vermine et à la pourriture (McGee, 2013). Bien que l'efficacité énergétique puisse être un avantage pour un bâtiment construit avec n'importe quel type de matériau, l'approche sera différente avec des murs creux ou pleins, ce qui peut influencer sur le choix du matériau. L'isolation est également utilisée avec les panneaux en bois, tels que les panneaux isolants structurels (SIP), composés d'une isolation en mousse entre deux feuilles de panneaux orientés. Les SIP offrent une isolation supérieure et des caractéristiques d'étanchéité à l'air qui créent des valeurs R élevées pour les murs (Singh, 2014).

Un type d'isolation moins utilisé est le matériau à changement de phase (PCM). Le PCM peut être utilisé avec des matériaux isolants à l'intérieur des murs, servant de système solaire passif. Le stockage de chaleur latente grâce à l'utilisation de PCM offre une solution attrayante pour absorber, stocker et libérer de la chaleur dans un bâtiment durant les périodes de gel et de fonte. Le PCM fonctionne dans les endroits où l'inertie thermique des murs et des plafonds est absorbée : il stocke la chaleur excessive pendant le jour et la libère pendant la nuit lorsque la température de l'air a baissé (Bax, Cruixent, & Komornicki, ND; Košny, 2015). La capacité du PCM à emmagasiner et à libérer de la chaleur réduit les fluctuations de température à l'intérieur du bâtiment, évitant ainsi l'utilisation de climatiseurs pour maintenir la température au frais, réduisant du même coup la consommation d'énergie (Bax, Cruixent et Komornicki, n.d.). En tant que matériau isolant, le PCM peut être utilisé avec des



structures en bois et en acier. Des études ont été menées pour comprendre la faisabilité de l'utilisation du PCM avec des murs en béton. Cependant, il existe un risque de fuite avec ce matériau (Chen, Kessel et Wolcott, 2012), il n'est donc pas aussi largement utilisé que d'autres matériaux en mousse.

D'autres mesures de conception peuvent également favoriser l'efficacité énergétique d'un bâtiment, telles que la réduction du rapport entre le plafond et le mur afin d'obtenir une meilleure isolation et d'augmenter l'épaisseur de la paroi (Stevens, 2017). L'utilisation de structures en bois lamellé-collé au toit et aux étages supérieurs peut également aider à corriger les trajectoires d'ensoleillement saisonnier et permettre des gains d'ensoleillement en hiver tout en limitant l'exposition au soleil en été (Craig & Jahraus, 2017). En outre, la réduction de l'utilisation de murs de verre ou de grandes fenêtres peut également accroître l'efficacité énergétique des bâtiments. Certaines juridictions ont déjà restreint les tours en verre en vertu des codes du bâtiment. Par exemple, la Ville de Toronto a interdit toutes les tours en verre en vertu des codes du bâtiment. L'Ontario a également adopté des exigences extérieures plus strictes pour les bâtiments en verre (Lorinc, 2016).

La masse thermique joue aussi un rôle dans l'efficacité. La masse thermique peut réduire les charges de refroidissement et les écarts de température ambiante dans les bâtiments. Le stockage de la chaleur dans l'enveloppe extérieure d'un bâtiment et dans les matériaux de construction à l'intérieur permet de libérer cette chaleur lentement dans l'environnement intérieur. En hiver, la chaleur stockée est libérée lorsque cela est nécessaire, et, en été, la chaleur peut être stockée pour réduire les températures internes et minimiser le besoin en énergie de refroidissement. La prise en compte de la masse thermique peut avoir un impact significatif sur l'efficacité énergétique (Balaras, 1996).

Le tableau 7 résume les différentes mesures décrites ci-dessus et leur applicabilité au bois, à l'acier et au béton.

Tableau 7. Mesures extérieures et intérieures pour améliorer l'efficacité énergétique

Caractéristiques du bâtiment	Mesure	Applicabilité au bois, à l'acier et / ou au béton
Extérieur	Couverture extérieure	Bois, acier et / ou béton
	Chauffage solaire passif	Bois, acier et / ou béton
	Isolant thermique pour balcons	Bois, acier et / ou béton
	Toits	Bois, acier et / ou béton
	Bois lamellé-collé	Bois
	Vitrage réduit	Bois, acier et / ou béton
Intérieur	Coffrages isolés	Bois, acier et / ou béton
	Isolation avec des matières premières	Béton
	Isolation SIPS	Bois
		Acier et bois
		Béton

5.1.1.1 Défis et opportunités

Grâce à l'accès aux informations sur l'utilisation de l'énergie (données), les mesures de construction et les possibilités d'efficacité, les acteurs concernés du secteur de la construction peuvent approfondir leurs connaissances et leur compréhension de l'efficacité énergétique et de l'impact environnemental et soutenir la transition vers un secteur de la construction à faibles émissions de carbone. Cependant, les sources de données sur les technologies



d'efficacité énergétique ne sont pas facilement disponibles et sont, pour la plupart, dispersées dans divers ministères, services publics et parties prenantes (Équiterre et The Pembina Institute, 2017).

En plus d'un manque de données, la commercialisation des produits crée un obstacle à l'adoption de ces matériaux alternatifs par l'industrie de la construction. Par exemple, il peut manquer de ressources pour commercialiser et diffuser efficacement les informations sur les produits aux parties prenantes telles que les ingénieurs. En outre, certains de ces produits ne parviennent pas à passer de prototype à des projets de démonstration à grande échelle, ce qui limite leur capacité à générer des données favorables sur les performances du matériau (Giesekam, Barrett et Taylor, 2016). Dans d'autres cas où les produits parviennent sur le marché et attirent l'attention d'ingénieurs et d'autres parties prenantes de la construction, d'autres priorités, telles que les coûts, peuvent influencer sur le choix des matériaux.

Une façon de résoudre certains de ces problèmes consiste à promouvoir un large éventail d'options de matériaux, car ce choix dépendra fortement de facteurs spécifiques au site et au projet. Le choix de matériaux de construction contenant le moins de carbone possible et augmentant l'efficacité énergétique d'un bâtiment dépend des connaissances, des priorités et des réglementations qui guident la prise de décision. Ainsi, en fonction du type de projet, les décideurs et les partisans de matériaux de construction et de conceptions écologiques peuvent promouvoir l'option la plus appropriée pour chaque type de projet (commercial, résidentiel, multi-logements, etc.). La promotion de ces options de matériaux inclut également le développement des compétences pour concevoir et mettre en œuvre de telles options et une législation qui tient compte et soutient ces matériaux alternatifs (Giesekam, Barrett et Taylor, 2016). Pour soutenir cette transition, une étape cruciale consiste à informer les décideurs par le biais d'études évaluant les obstacles à l'adoption de matériaux et identifier les éléments et les interventions susceptibles de soutenir les solutions visant à promouvoir les bâtiments à faibles émissions et à haute efficacité énergétique (Giesekam, Barrett et Taylor, 2016).

5.2 Décarbonisation et durabilité

5.2.1 Le rôle du ciment dans le béton

En 2016, la production mondiale de ciment était de 4,2 milliards de tonnes, principalement en Chine (un peu moins de 60 %) et en Inde (près de 7 %). Au cours de cette même année, le Canada a produit près de 12 millions de tonnes de ciment, soit moins de 1 % du total mondial. Dans un avenir rapproché, la demande par habitant dans les économies matures devrait rester constante, la croissance provenant des marchés en voie d'industrialisation, situés en Afrique et en Asie et, dans une certaine mesure, dans les anciens États soviétiques et en Amérique latine.

Le processus de fabrication du ciment peut être divisé en deux étapes : la production de clinker à partir de matières premières et la transformation ultérieure du clinker en ciment. Au cours de la première étape, les matières premières - principalement le calcaire, mais également de plus petites quantités d'argile, de schiste, de sable et de déchets industriels afin d'assurer le bon équilibre des produits chimiques - sont broyées et chauffées dans des fours à une température de 1 450 ° C. En conséquence, le calcaire est décomposé en oxyde de calcium et en dioxyde de carbone ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) dans un processus appelé calcination. L'oxyde de calcium résultant se combine ensuite avec les autres matières premières pour donner des silicates et des aluminates de calcium, composants principaux du ciment, sous forme de clinker. Au cours de la deuxième étape, le clinker est broyé avec d'autres composants minéraux pour produire du ciment; le gypse est utilisé pour contrôler les propriétés de prise alors que d'autres additifs sont utilisés pour ajuster d'autres caractéristiques telles que la perméabilité. Le ciment Portland traditionnel - le type de ciment le plus largement utilisé - contient 95 % de clinker, le reste étant du gypse.



La calcination entraîne des émissions de dioxyde de carbone d'environ 0,45 tonne par tonne de clinker et représente approximativement 55 % du dioxyde de carbone total émis pendant la production. Les combustibles utilisés dans les fours représentent 35 % du total des émissions, alors que l'utilisation de l'électricité et les transports représentent 10 %. L'intensité moyenne des émissions est d'environ 0,76 tonne de dioxyde de carbone par tonne de ciment au Canada.

Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC estime que les émissions de procédés de l'industrie du ciment étaient de 1,352 gigatonnes en 2010 et les émissions de combustion de 0,8 gigatonnes supplémentaires (Fischedick et al., 2014). Le plus récent rapport d'inventaire national du Canada estime que les émissions provenant de la production de ciment ont atteint 6 millions de tonnes d'équivalent en dioxyde de carbone en 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2018).

5.2.2 Mesures à court terme pour réduire les émissions

Dans de nombreuses juridictions, y compris le Canada, l'intensité des émissions a diminué au fil du temps. Cette réduction résulte en partie de mesures à court terme faciles à mettre en œuvre, et en partie à cause du passage à plus long terme à de meilleures technologies.

À court terme, quatre mesures principales peuvent être mises en œuvre afin de réduire l'intensité des émissions. Premièrement, la **substitution de clinker** réduit la proportion de clinker utilisée dans la production de ciment et le remplace par du laitier de haut fourneau moulu, des cendres volantes ou des matériaux volcaniques naturels susceptibles de réduire les émissions de dioxyde de carbone liées aux processus, aux combustibles et à l'énergie nécessaires à la production d'une tonne de ciment. Cependant, la réalisation de réductions supplémentaires peut être limitée par la disponibilité et le prix des substituts, ainsi que par l'acceptabilité des ciments mélangés en ce qui concerne les codes du bâtiment.

Le ciment Portland au calcaire est maintenant disponible partout au Canada et réduit les émissions de GES tout en permettant la réalisation d'activités supplémentaires d'atténuation des GES. Le ciment Portland au calcaire est une version modifiée du ciment qui inclut du calcaire supplémentaire et réduit la quantité d'énergie utilisée dans le processus de fabrication, réduisant ainsi considérablement les émissions de GES qui y sont associées (Concrete Producer, 2014).

Troisièmement, l'utilisation de **combustibles alternatifs** tels que les déchets et la biomasse pour alimenter les fours à ciment plutôt que des combustibles fossiles tels que le coke de pétrole et le charbon peut également entraîner une réduction des émissions. Les réductions d'émissions varieront selon le mélange de combustibles utilisés⁴, mais des estimations suggèrent que l'intensité des émissions pourrait baisser jusqu'à 25 % par rapport aux combustibles fossiles (Agence internationale de l'énergie, 2009). Cette substitution pourrait également entraîner une réduction simultanée des coûts. Bien que l'utilisation de combustibles de substitution pour chauffer les fours soit répandue dans certains pays où certaines usines sont presque entièrement alimentées par des combustibles de substitution, ce n'est pas une pratique bien établie dans de nombreux pays et cela peut constituer un levier important pour la réduction des émissions (Chatziaras, Psomopoulos et Themelis, 2015). Toutefois, la réalisation de ces réductions dépend de la législation en vigueur, l'existence de l'infrastructure requise et la disponibilité des combustibles à un coût compétitif.

Enfin, **l'amélioration de l'efficacité thermique et électrique** peut entraîner une réduction des émissions. L'efficacité thermique d'une installation dépend en grande partie du choix de l'équipement au moment de

⁴ Par exemple, la substitution au moyen de la biomasse signifie que les émissions de carbone biogénique doivent être prises en compte. Les émissions directes provenant de la combustion de déchets (pneus, par exemple) peuvent être considérables et comparables à la combustion de combustibles fossiles, mais les émissions tout au long de leur cycle de vie peuvent être plus faibles ou posséder d'autres avantages environnementaux.



l'installation et constitue donc une décision qui est prise tous les 40 ans. Cependant, une fois installé, la maintenance en cours et le fonctionnement de l'équipement influent sur son efficacité.

5.2.3 Technologies révolutionnaires pour la réduction des émissions

Étant donné que la majorité des émissions provenant de la production de ciment sont le résultat de la calcination, le potentiel de réduction avec les techniques de production actuelles est limité. Néanmoins, certaines technologies sont prometteuses, notamment l'augmentation de l'utilisation d'électricité (décarbonisée), ce qui est déjà le cas dans la majeure partie du Canada.

Peu d'installations spécialisées de captage et de stockage du carbone (CSC) post-combustion ont été déployées à ce jour, car la technologie est encore immature sur le plan commercial. Néanmoins, des exemples existent. Heidelberg Cement-Norcem a lancé en 2013 un projet CSC visant à tester différentes technologies dans son usine de Brevik, en Norvège. En 2016, le gouvernement norvégien a publié ses plans et son budget d'études de faisabilité à grande échelle pour le CSC, le projet de Norcem étant l'un des trois projets inclus. Les estimations initiales suggèrent un coût de réduction compris entre 100 et 150 EUR (150 et 230 CAD) par tonne de CO₂ capturé, selon les caractéristiques du projet (nombre de sources de dioxyde de carbone et mode de distribution) (Jakobsen, Roussanaly et Anantharaman, 2017). Au Canada, il existe actuellement une usine en exploitation, Boundary Dam, dont la mise en valeur est limitée par une combinaison de coûts élevés et de perspectives limitées de réduction de ces coûts à court terme (Leach, 2011).

En outre, un certain nombre de technologies incorporent des éléments du CSC. Notamment, en injectant les émissions de dioxyde de carbone captées (de l'industrie du ciment et d'ailleurs) dans le béton humide où il est piégé, réduisant simultanément les émissions dans l'atmosphère et augmentant le niveau de résistance du béton (CarbonCure, 2018). Parmi les autres technologies, on peut citer la transformation d'une usine en cheminée d'échappement pour capturer le dioxyde de carbone et le convertir en nanotubes de carbone et en oxygène (CarbonCure, 2018), et l'utilisation de dioxyde de carbone dans la production d'algues, ces algues étant par la suite utilisées comme biocarburants ou comme aliments pour animaux (Global Cement, 2014). Enfin, le renforcement de la capacité naturelle du béton à absorber le dioxyde de carbone lors de son utilisation (carbonatation minérale) constitue un autre moyen d'éliminer le dioxyde de carbone de l'atmosphère (Xi et al., 2016).

Au-delà de la technologie de production actuelle, de nouveaux produits pouvant être utilisés à la place du ciment dans le béton ont été développés au cours des dernières années. Parmi ceux qui ont été explorés à ce jour figurent des liants activés par des alcalis, des ciments basés sur la carbonatation de silicates de calcium et de silicates de calcium pré-hydratés et des ciments à base de bélite. Parmi ceux-ci, par exemple, un liant développé par Solidia est produit à l'aide d'un procédé à plus faible teneur en carbone différent du ciment Portland et est transformé en béton par exposition au dioxyde de carbone (Lafarge, 2015). Ces technologies présentent divers degrés de maturité. Par exemple, le ciment Solidia est déjà commercialisé pour une gamme limitée de produits en Amérique du Nord et en Europe (Académie européenne de recherche sur le ciment et Cement Sustainability Initiative, 2017), tandis que les liants activés par des alcalis vont vraisemblablement demeurer des produits de niche.

5.2.4 Acier

Le fer et l'acier sont des produits commercialisés à l'échelle mondiale, dont la fabrication consomme beaucoup d'énergie et qui constituent l'une des plus grandes sources d'émissions industrielles (Quader et al., 2015). De 2000 à 2013, la fabrication d'acier a presque doublé (Quader et al., 2015) et la demande devrait continuer à croître à un taux annuel comparable d'environ 5 % (Turner, 2012). World Steel (2017) estime une augmentation projetée de 1,5 fois d'ici 2050 et qu'une telle demande pourrait entraîner une augmentation comparable des émissions de dioxyde de carbone. L'acier produit au Canada est l'un des moins émetteurs de carbone à l'échelle mondiale; cependant, il reste encore des progrès à faire pour réduire davantage la production d'acier dans le pays.



Les principales approches de la fabrication de l'acier sont les suivantes : un convertisseur à oxygène (BOF), qui représente les deux tiers de la production mondiale; un four à arc électrique (EAF), représentant jusqu'à un tiers de la production; et un four Martin, processus utilisé par un petit pourcentage d'installations en cours de suppression progressive (Quader et al., 2015). Le BOF utilise une très grande quantité d'énergie et génère des quantités importantes d'émissions provenant de l'utilisation de coke dans le processus. Dans la méthode EAF, environ un quart de la production mondiale utilise des matériaux recyclés selon un procédé de réduction directe du fer, qui utilise de l'électricité et peut entraîner une réduction des émissions de moitié par rapport au BOF (Turner, 2012). Il est important de noter que le recyclage de l'acier consomme moins d'énergie et génère moins d'émissions par rapport à l'utilisation de matières premières. Les installations européennes et nord-américaines sont les chefs de file à cet égard. L'utilisation du gaz naturel au lieu du coke et du charbon dans la fabrication de l'acier pourrait également réduire considérablement les émissions directes. Cependant, les émissions de méthane provenant de l'extraction du gaz naturel jusqu'à la distribution pourraient avoir près de 100 fois le potentiel de réchauffement planétaire lors de leur rejet par rapport au dioxyde de carbone. Les diverses technologies actuelles utilisées et le coût élevé des approches alternatives auront un impact sur la décarbonisation du secteur.

La documentation analysée montre diverses réductions de la consommation d'énergie dans le secteur, d'environ 50 % en quelques décennies, mais cette forte réduction a presque atteint un plateau et des efforts supplémentaires seront nécessaires pour aller plus loin. Le Canadian Sheet Steel Building Institute (2008) note que grâce à des efforts volontaires, l'industrie sidérurgique canadienne a réduit son intensité énergétique d'environ 9 % depuis les années 1990 (Ressources naturelles Canada, 2018b). Il est également important de noter que la demande en énergie et les émissions dans le secteur varient considérablement d'une installation à l'autre et d'un pays à l'autre. Le Japon, les pays européens membres de l'OCDE, la Corée et les États-Unis ont une intensité énergétique inférieure à 2 gigajoules par tonne d'acier produite, alors que la production en Chine et en Ukraine nécessite trois fois plus d'énergie que la moyenne (Shatokha, 2016).

Pour réduire les émissions dans le secteur, deux approches peuvent être utilisées : l'utilisation de technologies et pratiques de pointe ou les meilleures disponibles, ou des approches révolutionnaires, innovantes et perturbatrices pour atteindre les objectifs de décarbonisation du milieu du siècle. Des approches à court terme pour réduire l'intensité d'émission de l'acier sont réalisables et peuvent se révéler rentables, notamment par le biais de politiques qui uniformiseraient les règles du jeu et réduiraient les fuites de carbone (tarification du carbone et mesures réglementaires, par exemple). Avec un coût de réduction de moins de 100 USD par tonne de dioxyde de carbone, la Chine pourrait réduire ses émissions de 230 MtCO₂ et l'Inde de 110 MtCO₂ (Turner, 2012). Il est important de noter que, compte tenu de la forte demande en énergie du secteur, les améliorations dans ce domaine auront non seulement des avantages en termes de réduction des émissions, mais amélioreront également le taux de rendement interne des projets.

L'amélioration de l'efficacité de la production, l'utilisation de coproduits, le recyclage et l'utilisation de la chaleur perdue pour d'autres activités peuvent offrir des avantages immédiats. La récupération des pertes de chaleur représente l'une des opportunités immédiates les plus importantes, représentant 20 à 50 % de l'énergie utilisée. Les technologies existantes comprennent le refroidissement à sec du coke, la récupération de la pression de tête, la coulée continue et la récupération du gaz dans le four (Turner, 2012). Le potentiel le plus important réside dans la récupération accrue de gaz de BOF (Turner, 2012). Les trois principales technologies de récupération de chaleur comprennent (Quader et al., 2015, p. 605) :

- Le gaz de coke produit dans le cadre du procédé avec convertisseur à oxygène pourrait être converti en combustibles plus légers ou utilisé dans d'autres processus.
- L'utilisation de l'énergie produite dans les fours de réchauffage pour produire de l'électricité.
- La récupération de l'énergie des scories grâce aux technologies mécaniques, à l'air et centrifuges, ou par l'utilisation de produits chimiques.



Des technologies transformatrices visant une décarbonisation importante du secteur sont à divers stades de recherche et développement dans différentes juridictions, notamment le recyclage des gaz de pointe, l'électrolyse, la réduction de la fusion et l'amélioration de l'utilisation de l'hydrogène (World Steel Association, 2017). Un projet européen a permis de réduire la consommation de coke d'environ un quart, grâce à cette approche, ce qui entraîne une réduction comparable du dioxyde de carbone (Shatokha, 2016). Une meilleure utilisation de l'électricité est également possible, telle que l'électrolyse alcaline pour produire d'autres métaux et l'électrolyse d'oxydes fondus pour favoriser la transformation de l'oxyde de fer sans produire de dioxyde de carbone. Le procédé HIsarna réduit la fusion en utilisant du dioxyde de carbone pur et permet sa capture à la fin du processus; en raison de l'élimination progressive de la fabrication et du frittage du coke, il a été possible de réduire de 20 % les émissions de dioxyde de carbone par rapport aux méthodes conventionnelles (Shatokha, 2016). Enfin, l'hydrogène peut également être utilisé dans la fusion éclair pour produire du fer à partir de la fonte brute sans dégager de dioxyde de carbone.

Nous avons pris note des efforts importants déployés par le secteur dans plusieurs juridictions et des investissements dans l'innovation technologique. Il est également important de noter qu'aucune des technologies précitées, que ce soit des améliorations à court terme ou des technologies de transformation, ne peut par elle-même réaliser des réductions importantes. La décarbonisation du secteur de l'énergie (par exemple, le secteur de l'électricité) jouera également un rôle essentiel dans la réduction des émissions du secteur, l'énergie étant un élément essentiel de la production d'acier et un certain nombre de technologies de réduction des émissions reposant sur une source d'électricité plus propre. La réalisation de la décarbonisation dans le secteur exigera également un changement radical des méthodes de production, le carbone restant une matière première essentielle et / ou le déploiement de technologies de capture et de stockage / utilisation du carbone, qui restent une option coûteuse avec un déploiement limité à l'échelle commerciale. À cet égard, nous notons que les trois quarts de toutes les émissions de la production d'acier proviennent de l'utilisation de coke et de charbon dans le procédé de traitement par BOF (Turner, 2012). Les technologies de transformation visant à réduire la dépendance au charbon et au coke et / ou une utilisation améliorée du dioxyde de carbone seront essentielles pour atteindre les objectifs de décarbonisation.

5.2.5 Foresterie

Le Canada possède l'un des plus vastes couverts forestiers, représentant environ un dixième du total mondial. Sa forêt boréale stocke 208 milliards de tonnes de carbone, soit un dixième du stock mondial, sur une superficie de 1,3 milliard d'acres (Conservation de la nature Canada, 2017). Nous abordons ci-dessous un certain nombre d'opportunités de grande valeur à court terme et des efforts nécessaires pour atteindre les objectifs de décarbonisation du milieu du siècle dans le secteur forestier. Outre les émissions de GES et leur séquestration, nous évaluons l'impact potentiel d'une demande accrue de produits du bois sur les biens et services écologiques fournis par les forêts. Plus spécifiquement, cette section évalue les contraintes potentielles sur les forêts résultant des risques climatiques, les incertitudes concernant la santé écologique future des forêts et, enfin, le rôle des forêts dans les efforts d'adaptation et de protection des espèces.

5.2.5.1 Mesures d'atténuation

Les efforts d'atténuation des changements climatiques dans les forêts canadiennes relèvent de deux domaines : la restauration et la conservation des forêts, d'une part, et l'amélioration des pratiques opérationnelles et la gestion des forêts, de l'autre. La perturbation et la fragmentation, en particulier dans la forêt boréale canadienne, résultant de décennies d'exploitation forestière, d'exploration et de production de pétrole et de gaz sont importantes dans la mesure où les politiques peuvent devoir donner la priorité aux efforts de restauration et de conservation (Asadollahi, 2015). En matière de conservation, la résiliation de baux dans des zones non perturbées et la désignation appropriée de forêts intactes peuvent soutenir les efforts d'atténuation à long terme, maintenir des forêts saines et contribuer aux engagements internationaux du Canada en matière de conservation. Il existe également d'importantes possibilités d'améliorer les pratiques forestières existantes et la gestion forestière au Canada, notamment : cycles de rotation, décomposition ou combustion des restes de matériaux,



perturbation des sols (notamment libération de carbone et perte en éléments nutritifs) et émissions de produits en fin de vie provenant de l'enfouissement.

À l'échelle mondiale, les forêts sont en déclin et, compte tenu de la valeur élevée de leur stockage de carbone et des menaces qui pèsent sur leur santé, il est essentiel de conserver et d'améliorer leur intégrité écologique. De plus, les forêts ont une valeur de séquestration à long terme importante et des émissions initiales importantes au moment de la récolte, qui ne doivent pas être négligées. Malcolm (2016) note que « tout effet positif de la gestion forestière - par exemple, la séquestration du carbone par les jeunes forêts ou le stockage à long terme du carbone dans les produits du bois - doit être mesuré par rapport à la « dette » contractée pendant cette transition [d'un peuplement forestier primaire à un peuplement (géré) secondaire]. » Il existe également des centaines de kilomètres de lignes sismiques, de mines de production d'acier et de routes d'accès issues d'activités industrielles datant de plusieurs décennies qui ne sont pas revenues à leur état d'origine, et certaines provinces peuvent avoir des exigences pour l'entretien des routes d'accès entraînant des perturbations permanentes et une perte de potentiel de séquestration. Ces perturbations pourraient être résolues grâce à des partenariats publics et privés, mais nécessiteraient des investissements importants. Les gouvernements pourraient donner la priorité aux efforts de restauration pour atteindre simultanément d'autres objectifs politiques, y compris des stratégies de rétablissement des espèces en péril.

Diverses études ont montré qu'il existait une méprise courante sur le remplacement de la séquestration du carbone dans les pratiques de gestion forestière (Fargione et al., 2008; Ter-Mikaelian, Colombo et Chen, 2014). En d'autres termes, il est erroné de croire que la récolte des arbres matures ne dégage aucune émission nette de GES en autant que les nouveaux arbres repoussent au même niveau de carbone qu'avant la récolte (Holtmark, 2012; Ter-Mikaelian, Colombo & Chen, 2014). En réalité, il y a une dette carbone lorsque les arbres matures sont récoltés et remplacés par de nouveaux arbres, bien que cette dette puisse être remboursée avant la fin de la période de rotation dans la forêt boréale selon le modèle forestier CMB-CFS3 (Natural Resources Canada, 2017).

Lorsque l'on considère les efforts de gestion forestière pour remplacer les stocks d'arbres récoltés, la quantité de carbone absorbée par les jeunes arbres peut prendre plusieurs siècles avant d'atteindre le niveau de séquestration des forêts anciennes. Le processus du cycle du carbone n'est pas linéaire et il est important de prendre en compte les taux de décomposition des arbres post-récoltés (troncs et systèmes de racines) ainsi que les perturbations naturelles observées pendant la période de croissance de nouveaux arbres pouvant arrêter ou interrompre la croissance (p.ex., feux de forêt, inondations, sécheresses).

Une étude récente a révélé que, d'ici 2030, les efforts mondiaux de conservation, de restauration et de gestion des terres dans les forêts, les zones humides, les prairies et les terres agricoles pourront permettre d'atteindre 37 % des réductions d'émissions nécessaires pour maintenir le réchauffement en dessous de 2 ° C, le reboisement fournissant la plus importante possibilité de réduction (Griscom, 2016). Cette étude note également que les mesures d'atténuation dans le secteur forestier sont parmi les plus rentables au monde, avec moins de 100 USD par tonne, dont un tiers du potentiel étant inférieur à 10 USD par tonne.

Outre les efforts de conservation et de restauration, les changements opérationnels et les améliorations apportées à la gestion des forêts peuvent également soutenir les efforts du secteur pour atteindre les objectifs de décarbonisation en profondeur. L'amélioration des cycles de rotation offre l'une des meilleures opportunités en matière de réduction. En plus de promouvoir des rotations plus longues, l'industrie pourrait également réduire l'utilisation de produits chimiques et maximiser le stockage de carbone (Talberth, DellaSala et Fernandez, 2015). Il existe également des options d'atténuation post-activité qui peuvent être améliorées, notamment le réaménagement des routes et des terrains perturbés. L'une des études citées note que « lorsqu'un site est exploité et que le bois est transformé en produits de bois récoltés de longue durée, seuls 18 % des stocks de carbone originaux sont préservés, et ce pendant quelques décennies tout au plus avant que ces produits de bois commencent à se décomposer » (Talberth, DellaSala et Fernandez, 2015, p. 4). En outre, dans le cas des forêts



boréales, il est noté que 65 à 95 % du carbone de l'écosystème est présent dans le sol (Bell et al., 2017, p. 16; Bradshaw et Warkentin, 2015; Lal, 2005).

5.2.5.2 Au-delà de la séquestration du carbone

Des phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents (des périodes sèches plus longues aux crues éclair) ainsi que des maladies (par exemple, la propagation d'organismes nuisibles) pourraient avoir une incidence importante sur les puits de carbone du Canada. Nous notons des incertitudes concernant l'impact total du changement climatique dans divers modèles de trajectoire d'émission. Cependant, en gardant à l'esprit les incertitudes, une approche de précaution pour protéger et améliorer la santé écologique des forêts est recommandée.

Deuxièmement, les forêts fournissent un habitat essentiel aux espèces, y compris celles qui nécessitent une protection en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* du gouvernement fédéral. Selon Global Forest Watch (2016), de 2000 à 2013, environ 5 % des grandes forêts intactes du Canada (une superficie de plus de 215 000 km²) ont été dégradées. Sur ce total, 90 % de la dégradation des forêts intactes s'est produite dans l'habitat d'espèces en péril, tandis que 500 000 km² de forêts intactes restantes étaient sous tenures. Ce taux de détérioration est inquiétant, en particulier à la lumière du Fonds mondial pour la nature 2017, qui a répertorié 451 espèces en rapide déclin démographique de 83 % en moyenne entre 1970 et 2017 (Fonds mondial pour la nature, 2017). Le caribou boréal, par exemple, fait face à une prédation accrue en raison de la destruction de forêts matures et anciennes par des activités industrielles dans les secteurs de la foresterie, du pétrole, du gaz et des mines (Environnement Canada, 2014).

Enfin, les forêts jouent un rôle essentiel dans les efforts d'adaptation au climat et leur dégradation augmente les risques d'incendies de forêt, de maladies, d'inondations et de glissements de terrain (Talberth, DellaSala et Fernandez, 2015). La récolte de produits du bois peut transformer les forêts indigènes en champs de broussailles ou les remplacer par des arbres plus jeunes, plus exposés aux incendies. Les anciennes forêts intactes ont également une forte rétention d'eau et assurent la cohésion des sols grâce à leur système racinaire, empêchant les glissements de terrain; cette capacité est réduite lorsque les arbres sont récoltés. Les routes d'accès, en particulier, peuvent canaliser les eaux de ruissellement des fortes tempêtes et avoir des impacts considérables. La dégradation de la couverture forestière par les sentiers de débardage et les routes d'accès, provenant d'activités historiques ou nouvelles, entraînera une diminution de la productivité nette de l'écosystème ou de l'absorption de carbone par les forêts (Talberth, DellaSala et Fernandez, 2015, p. 3–4). Enfin, les produits chimiques utilisés par le secteur forestier, tels que les engrais et les aérosols antiparasitaires, peuvent également avoir des impacts écologiques locaux, tant dans le sol que dans les plans d'eau à proximité.



6.0 Conclusions

Les études d'ACV du secteur du bâtiment sont complexes et hautement spécifiques, et malgré des améliorations significatives dans les méthodes d'ACV, on retrouve d'énormes variances dans les résultats d'ACV dans la littérature. L'ACV est un outil indispensable pour évaluer les matériaux de construction tels que le béton, l'acier et le bois, mais les décideurs et les concepteurs d'immeubles doivent être conscients des défis, limitations et incertitudes significatifs qui persistent.

Les producteurs de ciment et d'acier ont présentement accès à des technologies qui permettent d'atténuer les émissions incorporées dans leurs produits de façon significative. Par exemple, la substitution de combustibles pourrait réduire les émissions du ciment d'environ 20 % au Canada. Néanmoins, des voies de décarbonisation plus profondes pour ces produits sont peu probables à court et moyen termes. Pour le ciment, il est possible de décarboniser en substituant le clinker pendant la phase de production du ciment, d'utiliser des combustibles alternatifs (par exemple, la biomasse) pour alimenter le four à ciment et d'améliorer l'efficacité thermique et électrique afin de réduire les émissions. Pour l'acier, les options d'atténuation incluent l'amélioration de l'efficacité de la production, de l'utilisation du coproduit, du recyclage et de l'utilisation de la chaleur perdue pour d'autres activités. En ce qui concerne les produits du bois, des solutions déjà disponibles en matière de gestion forestière peuvent considérablement améliorer les puits d'émission dans les forêts canadiennes et pourraient contribuer de manière significative aux objectifs de réduction des émissions du Canada.

6.1 Incertitudes et variabilités régionales

Les principales incertitudes dans les analyses ACV identifiées dans l'étude sont liées aux émissions de carbone biogénique et, dans une moindre mesure, à la carbonatation du ciment. La variabilité régionale a été identifiée comme importante dans la production d'acier, l'élimination des matériaux de construction en bois dans les sites d'enfouissement et l'extraction de matières premières.

Les tests de sensibilité ont montré que les émissions de GES incorporées dans les produits du bois étaient considérablement affectées si elles incluaient des estimations des émissions de carbone biogénique. Différents scénarios de gestion forestière conduisant à des pertes permanentes de carbone dans le sol, à la récolte de forêts naturelles ou primaires et à des taux de régénération plus faibles ont été pris en compte et des estimations ont été effectuées sur la contribution potentielle des émissions de carbone biogénique au contenu total d'émissions intrinsèques dans les produits du bois. Sur la base d'un certain nombre d'hypothèses, des potentiels de GWP_{bio} de carbone allant de 0,0695 à 0,835 ont été identifiés pour ces scénarios et, globalement, ils remettent en cause l'affirmation courante selon laquelle le cycle du carbone biogénique dans les produits du bois au Canada est toujours - ou n'est peut-être même jamais - neutre en carbone.

Bien que la carbonatation du béton (c'est-à-dire l'absorption du dioxyde de carbone) devrait être incluse dans l'ACV du bâtiment, il est peu probable qu'elle ait un impact significatif sur les émissions globales du cycle de vie. Il convient de prendre des précautions lors de la modélisation du traitement de fin de vie du béton afin de ne pas inclure la gestion susceptible d'optimiser la carbonatation, car celle-ci est traitée en dehors des limites du système d'ACV.



6.2 Meilleures pratiques en ACV

Un certain nombre de meilleures pratiques importantes en matière d'ACV peuvent être mises en évidence à la suite de notre étude :

- Les études d'ACV de bâtiments doivent faire un meilleur travail d'analyse de sensibilité pour les hypothèses et variables importantes afin de mettre en évidence l'incertitude dans les résultats et de mieux comprendre comment ces résultats pourraient s'appliquer à des juridictions spécifiques avec leurs propres caractéristiques.
- Des modèles ACV dynamiques doivent être utilisés pour comptabiliser les émissions à mesure qu'elles se produisent, afin de comptabiliser avec précision les impacts du forçage radiatif tout au long de la période d'étude.
- Ne comptabilisez pas deux fois les bénéfices nets potentiels de la réutilisation, du recyclage et/ou de la valorisation énergétique dans l'ACV.
- Assurez-vous que les bases de données utilisées sont récentes et identifiez leur pertinence régionale.
- Fournissez une liste complète des hypothèses utilisées dans l'analyse du cycle de vie.

6.3 Développement de politiques

À court et à moyen termes, les politiques et les actions devraient accorder la priorité à la réduction des émissions au stade de l'utilisation qui sont généralement estimées à environ 60 à 95 % du total des émissions. L'amélioration de l'efficacité énergétique et la construction de nouveaux bâtiments à faible consommation d'énergie ou à consommation énergétique nette zéro offrent le potentiel d'atténuation le plus élevé du secteur de l'environnement bâti. Une tarification efficace du carbone et des politiques complémentaires couvrant le secteur de la fabrication contribueront également à la décarbonisation des émissions incorporées des matériaux de construction, bien qu'à un rythme probablement inférieur à celui de la décarbonisation de l'utilisation des bâtiments. En outre, les politiques et les codes du bâtiment devraient promouvoir la longévité, la durabilité et l'efficacité du service des bâtiments, car ces améliorations peuvent avoir des avantages importants en termes de réduction des émissions de GES.

Les responsables du développement de politiques doivent être particulièrement vigilants et éviter de tirer des conclusions à partir d'études qui ne sont pas transparentes sur les hypothèses et les limites du système et qui ne peuvent pas démontrer qu'elles utilisent des données d'émission et d'énergie à jour et appropriées au niveau régional. Sans données de base détaillées et sans compréhension des méthodes d'ACV, les décideurs auront du mal à interpréter les résultats de manière fiable afin de contribuer à une bonne politique.

Ignorer les émissions de cycle de vie au stade de l'utilisation ou d'autres éléments de construction peut donner une idée erronée de la contribution relative des émissions intrinsèques lors de la comparaison des éléments structurels d'un bâtiment. Dans un contexte politique, cela peut conduire à des stratégies d'une portée trop étroite qui ne prennent pas en compte le tableau complet de la réduction globale des émissions des bâtiments.

Les décideurs doivent également faire preuve de prudence lors de la conception de politiques pouvant être préférentielles par rapport à un matériau de construction. Chaque conception de bâtiment est unique et, même si une conception de bâtiment peut remplacer des éléments en bois, en acier ou en béton dans une certaine mesure, tous les matériaux sont généralement importants indépendamment de la préférence déclarée pour un type de structure donnée. Des politiques devraient être développées pour soutenir et favoriser la décarbonisation des émissions au cours du cycle de vie de tous les matériaux de construction et ne pas favoriser un matériau ou une application sans preuves claires que les émissions totales sur l'ensemble du cycle de vie sont effectivement réduites.



Étant donné que la gestion forestière peut agir de différentes manières pour améliorer la séquestration du carbone, il est important d'envisager un large éventail d'activités de gestion forestière susceptibles d'accroître les puits de carbone, notamment des rotations de récolte plus longues et la décision de ne pas récolter en réponse au changement climatique.

Le choix d'une combinaison de matériaux de construction produisant le moins de carbone possible et augmentant également l'efficacité énergétique d'un bâtiment dépendra des connaissances, des priorités et des réglementations qui guident la prise de décision. Pour soutenir cette transition, une étape cruciale consistera à informer les décideurs par le biais d'études évaluant les défis associés à la sélection de la combinaison de matériaux la moins intensive en carbone. Une deuxième étape consiste à identifier les points de levier et les interventions susceptibles de supporter la construction de bâtiments à faible émission d'énergie et à haut rendement énergétique.

6.4 Besoins de recherche

6.4.1 Bois

Au niveau national, des efforts supplémentaires sont nécessaires au Canada pour établir une base de référence réaliste pour la gestion des forêts et la comptabilité des stocks nationaux, ainsi que pour l'analyse ACV des bâtiments. Une étude détaillée et une modélisation sont nécessaires pour étudier des régions et des forêts aménagées spécifiques au Canada et pour prendre en compte les effets cumulatifs de forçage radiatif de multiples cycles de récolte.

6.4.2 Béton

Les émissions indirectes dues aux changements d'affectation des sols associés au défrichement des terres en vue de l'extraction des matières premières dans les carrières ne sont également pas bien documentées et doivent être examinées plus à fond.

6.4.3 Acier

La localisation géographique de l'approvisionnement en acier et le procédé par lequel il est produit affectent de manière significative les émissions intrinsèques des matériaux de construction en acier. Par exemple, les usines qui utilisent des matières premières en acier recyclé peuvent réduire les émissions d'un facteur 2 à 4 par rapport à l'acier issu de minerai vierge. Davantage de données devraient être disponibles pour aider les architectes et les ingénieurs à comprendre la source des produits en acier qu'ils achètent et leurs effets sur les émissions.

6.4.4 Général

La conduite d'une ACV consécutive est particulièrement importante dans le contexte de l'élaboration de politiques et pour appuyer ou promouvoir l'utilisation d'un matériau par rapport à un autre. L'augmentation de la demande d'un type de matériau peut avoir des effets surprenants sur l'intensité des émissions au stade de la production. Dans le cas des matériaux de construction en bois, une augmentation de la demande en bois a un impact direct sur la capacité des forêts à constituer des stocks de carbone durables, modifiant potentiellement les performances attendues de ces matériaux en termes d'émissions. Dans le cas du béton, une augmentation de la demande pourrait entraîner des problèmes d'approvisionnement local en matières premières et augmenter les émissions associées aux matières premières et leur extraction. Dans le cas de l'acier, une augmentation de la demande devra peut-être être satisfaite par des importations en provenance de pays qui appliquent des méthodes de production beaucoup plus intensives en émissions que le Canada. Les gouvernements devront apporter leur soutien aux analyses ACV consécutives afin de développer des politiques pouvant prendre en compte ces nuances.



Les ensembles de données pouvant fournir une représentation régionale des émissions de la production, de la construction, de l'utilisation et celles de la fin de vie sont nécessaires dans une ACV pour supporter une prise de décision éclairée, mais ne sont tout simplement pas disponibles. Le gouvernement fédéral devrait investir dans un inventaire national actualisé et régionalisé couvrant l'ensemble du cycle de vie.



Références

- Achat, D. L., Fortin, M., Landmann, G., Ringeval, B., & Augusto, L. (2015). Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. *Scientific Reports*, 5 (article 15991). Extrait de <https://www.nature.com/articles/srep15991>
- Agostini, A., Giuntoli, J. & Boulamanti, A. (2014). *Carbon accounting of forest bioenergy*. Commission européenne. Extrait de http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC70663/eur25354en_online.pdf
- Andersson R., Fridh K., Strippel H., Häglund M. (2013). Calculating CO₂ uptake for existing concrete structures during and after service life. *Environmental Science and Technology*, 47 (20), 11625–11633. Extrait de doi :10.1021/es401775w
- Athena Sustainable Materials Institute. (2018). Cradle-to-gate lifecycle assessments including : Canadian Glulam Manufacture; Canadian Orientated Strand Board; Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber, and Canadian Softwood Plywood Sheathing. Extrait de <http://www.athenasmi.org/resources/publications/>
- Axelrod, J. (2017, September 21). Forest degradation : Canada's skeleton in the closet. National Resources Defense Council. Extrait de <https://www.nrdc.org/experts/josh-axelrod/forest-degradation-canadas-skeleton-closet>
- Balaras, C. A., (1996). The role of thermal mass on the cooling load of buildings : An overview of computational methods. *Energy and Buildings*, 24(1996), 1–10.
- Bataille, C., Sawyer, D., & Melton, N. (2015). *Pathways to deep decarbonization in Canada*. Extrait de http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_CAN.pdf
- Bax, L., Cruxent, J., & Komornicki, J. (n.d.). *Innovative chemistry for energy efficiency of buildings in smart cities*. Extrait de <http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/Innovative-Chemistry-for-Energy-Efficiency-of-Buildings-in-SmartCities.pdf>
- Bell, A. Berger, P. Moola, F., Saunders, G... & Legg, D. (2017). *Submission to the Government of Ontario's "Opportunities to Enhance Carbon Storage?" discussion paper*. Présenté par by Ontario Nature, Citizens United for a Sustainable Planet, David Suzuki Foundation, Environment North, Green Peace Canada, Plenty Canada, Kingston Field Naturalists, Lennox & Addington Stewardship Council, Quinte Field Naturalists, Sault Naturalists' Club of Ontario & Michigan et Thunder Bay Field Naturalists.
- Biswas, W. K. (2014). Carbon footprint and embodied energy consumption assessment of building construction works in Western Australia. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, 179–186.
- Blengini, G.A. & Di Carlo, T. (2010). Energy-saving policies and low-energy residential buildings : An LCA case study to support decision makers in Piedmont (Italy). *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 652–665. Extrait de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-010-0190-5>
- Bradshaw, C. & Warkentin, I. (2015). Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux. *Global and Planetary Change*, 128, 24–30.
- Buchholz, T., Friedland, J., Hornig, E., Keeton, S., Zanchi, G., & Nunery, J. (2014). Mineral soil carbon fluxes in forests and implications for carbon balance assessments. *GCB Bioenergy*, 6. Extrait de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcbb.12044>



Canadian Sheet Steel Building Institute. (2008). *Canadian steel industry : Leading the shift to green. Environmental Fact Sheet*. Extrait de <http://www.greenstonestructuralsolutions.ca/dev/wp-content/uploads/2016/10/CSSBI-Environmental-fact-sheet-2.pdf>

CarbonCure. (2018). Technology. Extrait de <http://carboncure.com/technology/>

Chatziaras, N., Psomopoulos, C., & Themelis, N. (2015). Use of waste derived fuels in cement industry : A review. *Management of Environmental Quality : An International Journal*, 27 (2), 178–193. Extrait de <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/MEQ-01-2015-0012>

Chen, F., Kessel, A., & Wolcott, M. (2012). *A novel energy saving wood product with phase change materials*. Extrait de <http://www.swst.org/wp/meetings/AM12/pdfs/papers/SP-3.pdf>

Chou, J-S. & Yeh, K-C. (2015). Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. *Journal of Cleaner Production*, 101, 137–147. Extrait de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.001>

Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete : Influence on their carbon footprint. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 549–556. Extrait de https://www.researchgate.net/profile/Frank_Collins/publication/225446969_Inclusion_of_carbonation_during_the_life_cycle_of_built_and_recycled_concrete_Influence_on_their_carbon_footprint/links/0deec5297e9cb76c72000000/Inclusion-of-carbonation-during-the-life-cycle-of-built-and-recycled-concrete-Influence-on-their-carbon-footprint.pdf

Concrete Producer. (2014). The advantages of Portland-Limestone cement. Extrait de https://www.theconcreteproducer.com/how-to/concrete-production/the-advantages-of-portland-limestone-cement_o

Craig, S., & Jahraus, N. (2017). UBC Engineering Student Centre. Extrait de <http://www.sabmagazine.com/blog/2017/10/30/ubc-engineering-student-centre/>

EDGAR. (2016). *Trends in global CO₂ emissions : 2016 report*. Extrait de http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-103425.pdf

EN 15978. (2011). *Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. Extrait de <https://www.en-standard.eu/ilnas-en-15978-sustainability-of-construction-works-assessment-of-environmental-performance-of-buildings-calculation-method/>

Environnement et Changement climatique Canada (2017a). *Canada's 7th National Communication and 3rd biennial report*. Extrait de http://unfccc.int/files/national_reports/national_communications_and_biennial_reports/application/pdf/82051493_canada-nc7-br3-1-5108_eccc_can7thncomm3rdbi-report_en_04_web.pdf

Environnement et Changement climatique Canada (2017b). *National inventory report 1990–2015 : Greenhouse gas sources and sinks in Canada*. Présentation du Canada à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Environnement et Changement climatique Canada (2018). *Draft national inventory report 1990-2016 : Greenhouse gas sources and sinks in Canada*. Extrait de https://ecccdocs.techno-science.ca/en/search/subject_area/CANADAs%20Greenhouse%20Gas%20Emissions

Environnement Canada (2014). *Recovery strategy for the woodland caribou, Southern Mountain population (Rangifer tarandus caribou) in Canada [Recommandation] (Species at Risk Act Recovery Strategy Series)*. Extrait de https://www.registrelep-sararegistry.gc.ca/virtual_sara/files/plans/rs_woodland_caribou_bois_s_mtn_pop_0114_e.pdf



Équiterre & The Pembina Institute. (2017). *Federal policies for low-carbon buildings : A blueprint to implement the Pan-Canadian Framework buildings strategy*. Extrait de <http://www.pembina.org/reports/federal-policies-for-low-carbon-buildings-2017-en.pdf>

European Cement Research Academy & Cement Sustainability Initiative. (2017). *Development of state of the art-techniques in cement manufacturing : Trying to look ahead*. CSI/ECRA Technology Papers. Genève : European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative.

Fargione, J., Hill, J., Tilman, D., Polasky, S. & Hawthorne, P. (2008). Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science Magazine*, 319, 1235–1238.

Fischedick, M., Roy, J., Abdel-Aziz, A., Acquaye, A., Allwood, J. M., Ceron, J.-P. ... Tanaka, K. (2014). Industrie. In Edenhofer et al. (Eds.), *Climate change 2014 : Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press.

Ghattas, R., Gregory, J., Olivetti, E., and Greene, S. (2013). *Life cycle assessment for residential buildings : A literature review and gap analysis*. Concrete Sustainability Hub. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology. Extrait de <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/LCAforResidentialBuildings.pdf>

Giesekam, J., Barrett, J., & Taylor, P. (2016). Construction sector views on low carbon building materials. *Building Research & Information*, 44(4), 423–444.

Global Cement. (2014, July 16). From cement stacks to fish ponds – algae carbon capture. Extrait de <http://www.globalcement.com/news/item/2694-from-cement-stacks-to-fish-ponds-%E2%80%93-93-algae-carbon-capture>

Global Forest Watch. (2016). 4.8 % (216 199 km²) decrease in Canada's large intact forest landscapes between 2000 and 2013. Extrait de <https://globalforestwatch.ca/sites/gfwc/files/publications/IFL2013%20Press%20Release%20July%202016.pdf>

GLOBE Advisors. (2017). *Carbon sequestration in forest-based wood products* (Draft). Pacific Northwest Building Resilience Coalition.

Grant R. F. et al., (2010). Net ecosystem productivity of temperate and boreal forests after clearcutting : A Fluxnet-Canada measurement and modelling synthesis. *Tellus B*, 62(5), 475–496.

Griscom, B. W., Adams, J., Ellias, P. W., Houghton, R. A. ... Fargione, J. (2016). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences [PNAS]*, 144(44), 11645–11650. Extrait de doi.org/10.1073/pnas.1710465114.

Grann, B. (2013). *A comparative life cycle assessment of two multistory residential buildings : Cross-laminated timber vs. concrete slab and column with light gauge steel walls*. Vancouver, BC : FPInnovations.

Guggemos, A & Horvath, A. (2005). Comparison of environmental effects of steel- and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93–101. Extrait de DOI : 10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11 :2(93)

Hasanbeigi, A., Arens, M., & Price, L. (2013). Alternative emerging ironmaking technologies for energy-efficiency and carbon dioxide emissions reduction : A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 645–658.

Holtmark, B. (2012). Harvesting in boreal forests and the biofuel carbon debt. *Climate Change*, 112, 415–428.



Holtmark, B. (2015). Quantifying the global warming potential of CO₂ emissions from wood fuels. *GCB Bioenergy*, 7, 195–206

International Energy Agency. (2009). *Cement technology roadmap 2009*. Extrait de <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>

International Energy Agency. (2016). *Energy, climate change and environment*. Extrait de <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ECCE2016.pdf>

Intergovernmental Panel for Climate Change. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Vols. 1–8. Préparé par le National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Japon : IGES.

Intergovernmental Panel for Climate Change. (2014). Industrie. In O. Edenhofer, et al. (Eds.), *Climate change 2014 : Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Extrait de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter10.pdf

ISO 14040 (2006). Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. ISO 14044 (2006). Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Exigences et lignes directrices

ISO 21930 (2017). Développement durable dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil -- Règles principales pour les déclarations environnementales des produits de construction et des services.

Jakobsen, J., Roussanaly, S., & Anantharaman, R. (2017). A techno-economic case study of CO₂ capture, transport and storage chain from a cement plant in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 144, 523–539. Extrait de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616321837?via%3Dihub>

James, J. & Harrison, R. (2016). The effect of harvest on forest soil carbon : A meta-analysis. *Forests*, 7(308). Extrait de <http://www.mdpi.com/1999-4907/7/12/308/htm>

John, S., Nebel, B., Perez, N., & Buchanan, A. (2008). *Environmental impacts of multi-storey buildings using different construction materials*. Extrait de https://ir.canterbury.ac.nz/bitstream/handle/10092/8359/12637413_JOHN%20STEPHEN%20ET%20AL%20Environmental%20Impacts%20of%20Multi-Storey%20Buildings%20Using%20Different%20Construction%20Materials%20MAF%20Report%202008.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Junnila, S., Horvath, A., & Guggemos, A.A. (2006). Life-cycle assessment of office buildings in Europe and the United States. *Journal of Infrastructure Systems*, 12(1), 1017. Extrait de : <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%291076-0342%282006%2912%3A1%2810%29>

Kośny, J. (2015). Short history of PCM applications. Sous *PCM-Enhanced Building Components : An application of phase change materials in building envelopes and internal structures* (pp. 21–59). Switzerland : Springer International Publishing.

Lafarge. (2015). *Lafarge and Solidia commercialize a new low-carbon solution for the construction sector*. Extrait de http://www.lafarge.com/sites/default/files/atoms/files/04282015-press_innovation-lafarge_solidia_new_low_carbon_solution-uk.pdf

Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220, 242–258.



Leach, A. (2011). Time to come clean on CCS. Extrait de <http://andrewleach.ca/canadian-climate-policy/time-to-come-clean-on-ccs>

Liu, W., Zhang, Z., Xie, X., Yu, Z., Gadow, K., Xu, J., Zhao, S., & Yang, Y. (2017). Analysis of the global warming potential of biogenic CO₂ emission in life cycle assessments. *Scientific Reports*, 7, 39857. DOI : 10.1038/srep39857

Lorinc, J. (2016). Ontario looks to close loophole on energy standards for buildings. *Globe and Mail*. Extrait de <https://www.theglobeandmail.com/life/home-and-garden/architecture/ontario-looks-to-close-loophole-on-energy-standards-for-buildings/article29261814/>

Lucon O., D. Üрге-Vorsatz, A. Zain Ahmed, H. Akbari, P. Bertoldi, L.F. Cabeza, N. Vilariño, M. V. (2014). Buildings. In O. Edenhofer, et al. (Eds.), *Climate change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, Cambridge.

Malcolm, J. (2016). *Mémoire présenté au document de travail du gouvernement de l'Ontario* (Numéro d'enregistrement 012-8685).

Marceau, M. L. & VanGeem, M. G. (2006). Comparison of the life cycle assessments of an insulating concrete form house and a wood frame house. *Journal of ASTM International*, 3 (9). Extrait de http://www.polysteel.us/GreenGuide/PDF_files/tab8/06_Life%20Cycle%20Comparison%20ICFs%20vs.%20Wood.pdf

McGee, C. (2013). Materials :Your home. Extrait de <http://www.yourhome.gov.au/sites/prod.yourhome.gov.au/files/pdf/YOURHOME-Materials.pdf>

McKinsey&Company. (2010). Energy efficiency : A compelling global resource. Extrait de https://www.mckinsey.com/~/media/.../A_Compelling_Global_Resource.ashx

Morisson Hershfield (n.d.). *LCA and energy analysis on a mid-rise residential building*. Rapport présenté à FPInnovations.

Nässen, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings : An input-output analysis. *Energy*, 32, 1593–1602. Extrait de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544207000163>

Nave, L.E., et al. (2010). Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259(5), 857–866. Extrait de doi :10.1016/j.foreco.2009.12.009

National Council for Air and Stream Improvement, Inc. (2013). A review of biomass carbon accounting methods and implications. *Technical Bulletin No. 1015*. Research Triangle Park, N.C. : National Council for Air and Stream Improvement, Inc. Extrait de <http://www.ncasi.org/Downloads/Download.ashx?id=8832>

Natural Resources Canada. (2018a). Energy and greenhouse gas emissions (GHGs). Extrait de <http://www.nrcan.gc.ca/energy/facts/energy-ghgs/20063>

Natural Resources Canada. (2018b). Industrial sector – Disaggregated industries Canada. Extrait de <http://oee.nrcan.gc.ca/corporate/statistics/neud/dpa/showTable.cfm?type=CP§or=id&juris=ca&rn=47&page=0>

Ochsendorf, J., Norford, K., Brown, D., Durschlag, H., Hsu, S., ... Wildnauer, M. (2011). *Methods, impacts, and opportunities in the concrete building life cycle*. Massachusetts Institute of Technology & Concrete Sustainability Hub. Extrait de <http://www.advantageicf.com/downloads/sustainability/MIT%20Buildings%20LCA%20Report.pdf>



- Pearl, D. & Chen, C. (2017). Bois Ellen Housing Co-op. *SABMag*, 58, 14–17.
- Quader, M., Ahmed, S., Ghazilla, R., Ahmed, S., & Dahari, M. (2015). A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 594–614.
- Robertson, A. Lam, F., & Cole, R. (2012). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives : Laminated timber or reinforced concrete. *Buildings*, 2, 245–270. Extrait de <https://ai2-s2-pdfs.s3.amazonaws.com/0fd9/d63e8f95e03931bea50d6230594feb3323fd.pdf>
- Rossi, B., Marique, A.-F., Glaumann, M., & Reiter, S. (2012). Lifecycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool. *Building and Environment*, 51, 395–401. Extrait de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.017>
- Ruuska, A. P. & Häkkinen, T. M. (2015). The significance of various factors for GHG emissions of buildings. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8, 317–330. Extrait de <http://dx.doi.org/10.1080/19397038.2014.934931>
- Salazar, J. & Meil, J. (2009). Prospects for carbon-neutral housing : The influence of greater wood use on the carbon foot print of a single-family residence. *Journal of Cleaner Production*, 17(17), 1563–1571. Extrait de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.06.006>
- Sathre, R. (2007). *Life cycle energy and carbon implications of wood-based materials and construction*. Extrait de <http://miun.diva-portal.org/smash/get/diva2:2032/FULLTEXT01.pdf>
- Säynäjoki, A., Heinonen, J. Junnila, S. & Horvath, A. (2017). Can life-cycle assessment produce reliable policy guidelines in the building sector? *Environmental Research Letters*, 12. Extrait de <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa54ee/pdf>
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., ... Yu, T. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. *Science*, 319(5867), 1238–1240. Extrait de <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1151861>
- Sharma, A., Saxena A., Sethi, M., Shree, V., & Varun. (2011). Life cycle assessment of buildings : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 871-875. Extrait de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.008>
- Shatokha, V. (2016). Environmental sustainability of the iron and steel industry : Towards reaching the climate goals. *European Journal of Sustainable Development*, 5(4), 289–300.
- Singh, V. (2014). Green building materials. Extrait de https://www.coa.gov.in/show_img.php?fid=137 Smyth, C. E., Stinson, G., Neilson, E., Lemprière, T.C., Hafer, M., Rampley, G. J., & Kurz, W. A. (2014).
- Quantifying the biophysical climate change mitigation potential of Canada's forest sector. *Biogeosciences*, 11, 3515–3529. Extrait de <https://www.biogeosciences.net/11/3515/2014/bg-11-3515-2014.pdf>
- Stevens, P. (2017). Bergeron Centre for Engineering Excellence. *SABMag*, 58, 8–16.
- Stralberg, D., Wang, X., Parisien, M.-A., Robinne, F.-N., Solymos, P., Mahon, C. L. ... Bayne, E. M. (2018). Wildfire-mediated vegetation change in boreal forests of Alberta, Canada. *Ecosphere*, 9(3), e02156. Extrait de <https://doi.org/10.1002/ecs2.2156>



Talberth, J, DellaSala, D. & Fernandez, E. (2015). *Clearcutting our carbon accounts*. Ashland : GEOS Institute. Extrait de <https://sustainable-economy.org/wp-content/uploads/2015/11/Clearcutting-our-Carbon-Accounts- Final-11-16.pdf>

Ter-Mikaelian, M., Colombo, S. & Chen, J. (2015). The burning question : Does forest bioenergy reduce carbon emissions? A review of common misconceptions about forest carbon accounting. Extrait de <http://ucanr.edu/sites/forestry/files/212529.pdf>

The Construction Specifier. (2014, July 30). Enhancing energy performance with balcony thermal breaks. Extrait de <https://www.constructionspecifier.com/enhancing-energy-performance-with-balcony-thermal-breaks/>

The Nature Conservancy of Canada. (2017). *Impact report 2017*. Extrait de <https://www.tnccanada.ca/invest-in-nature/annual-reports/canada-2017-impact-report.xml>

Turner, M. (2012). *Mitigating iron and steel emissions*. Columbia Climate Centre. Earth Institute, Columbia University. Extrait de <http://climate.columbia.edu/files/2012/04/GNCS-Iron-Steel.pdf>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2011, November 22). *Synthesis report of the technical assessments of the forest management reference level submissions, Ad Hoc Working Group on Further Commitments for Annex I Parties under the Kyoto Protocol*. Note du secrétariat.

World Steel Association. (2017). *Steel's contribution to a low carbon future and climate resilient societies*. Extrait de https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:eafbd41c-3674-49c4-8efe-df26ed7888fe/Position_paper_climate_2017.pdf

World Wildlife Fund. (2017). *Living planet report Canada : A national look at wildlife loss*. Extrait de http://assets.wwf.ca/downloads/WEB_WWF_REPORT.pdf

Xi, F., Davis, S., Ciais, P. Crawford-Brown, D., Guan, D. & Zhang, Y. (2016). Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nature Geoscience*, 9, 880–883. Extrait de <https://www.nature.com/articles/ngeo2840>



Annexe A

Données de Säynäjoki et al. (2017) utilisées dans la Figure 2.

GES d'un cycle de vie du berceau à la porte (tCO ₂ e / m ²)	Type d'ACV	Type de bâtiment	Emplacement	Zone climatique*	Surface (m ² brut)	Matériau
0,33	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Béton
0,35	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Béton
0,08	Processus	Appartements	SE	Dfc	1 679	Béton
0,22	Processus	Appartements	FI	Dfc	2 447	Béton
0,2	Processus	Appartements	FI	Dfc	1 346	Béton
0,36	Processus	Bureaux	FI	Dfc	15 600	Béton
0,41	Processus	Bureaux	FI	Dfc	24 000	Béton
0,55	Hybride	Bureaux	US	Dfb	4 400	Béton
0,26	Processus	Appartements	FI	Dfc	1 679	Béton
0,26	Processus	Appartements	FI	Dfc	1 700	Béton
0,34	Hybride	Bureaux	US	Dfc	4 400	Béton
0,55	Hybride	Bureaux	FI	Dfb	4 400	Béton
0,38	Processus	Bureaux	FI	Dfc	9 000	Béton
0,84	Hybride	Bureaux	TH	Aw	60 000	Béton
0,27	Processus	Appartements	FI	Dfc	2 065	Béton
0,19	Processus	Appartements	CH	Dwa	3 913	Béton
0,55	Processus	Appartements	CA	Dwa	3 913	Béton
0,22	Processus	Bureaux	UK	Cfb	87 109	Béton
0,22	Processus	Bureaux	UK	Cfb	87 109	Béton
0,22	Processus	Bureaux	UK	Cfb	87 109	Béton
0,42	Processus	Bureaux	CA	Dfb	14 233	Béton
0,54	Processus	Appartements	AT	Cfb	1 980	Béton
0,67	Processus	Appartements	AT	Cfb	970	Béton
0,77	Processus	Appartements	AT	Cfb	1 150	Béton
0,36	Processus	Bureaux	IT	Cfb	4 790	Béton
0,44	Processus	Appartements	IT	Cfb	2 610	Béton



GES d'un cycle de vie du berceau à la porte (tCO ₂ e / m ²)	Type d'ACV	Type de bâtiment	Emplacement	Zone climatique*	Surface (m ² brut)	Matériau
1,1	Intrants Extrants	Appartements	FI	Dfc	21 546	Béton
0,52	Processus	Public	AU	Csa	4 020	Béton
1,39	Hybride	Appartements	LE	Csa	1 232	Béton
0,42	Hybride	Appartements	TU	Csa	471	Béton
0,74	Hybride	Appartements	TU	Csa	4829	Béton
0,58	Processus	Public	CA	Dfb	2 100	Béton
0,52	Processus	Appartements	KO	Dwa	208 392	Béton
0,64	Processus	Public	CH	Cfa	16 873	Béton
0,36	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Acier
0,38	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Acier
0,62	Hybride	Bureaux	US	Dfb	4 400	Acier
0,35	Processus	Public	CA	Dfb	2 100	Acier
0,32	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Bois
0,34	Processus	Bureaux	CA	Dfc	4 620	Bois
0,05	Processus	Appartements	SE	Dfc	1 679	Bois
0,22	Processus	Appartements	SE	Dfc	1 700	Bois
0,3	Processus	Appartements	SE	Dfc	1 679	Bois
0,19	Processus	Appartements	FI	Dfc	2 065	Bois
0,13	Processus	Bureaux	CA	Dfb	14 233	Bois
0,19	Processus	Appartements	CH	Dwa	3 913	Bois
0,49	Processus	Appartements	AT	Cfb	1 609	Bois
0,66	Processus	Appartements	AT	Cfb	1 381	Bois
0,03	Processus	Appartements	DE	Cfb	726	Bois
0,32	Processus	Appartements	NO	Dfb	160	Bois
0,12	Processus	Public	CA	Dfb	2 100	Bois

*Clé des zones climatiques



Type	Abréviation	Identification
Zone climatique	Dfc	neige, entièrement humide et étés frais - par exemple, la Scandinavie et d'autres régions du nord de l'Europe
	Cfb	chaud, entièrement humide, étés modérément chauds, par exemple l'Europe centrale et certaines régions de l'Australie
	Dfb	neige, entièrement humide, étés modérément chauds - par exemple, le Midwest des États-Unis et certaines régions d'Europe orientale
	Aw	équatorial, hivers secs - par exemple, les marges extérieures des zones tropicales, parfois une zone tropicale intérieure
	Csb	chaud, steppes, étés modérément chauds, par exemple, nord-ouest de l'Italie
	Dwa	neige, hivers secs, étés chauds, par exemple, certaines régions de la Chine
	Csa	chaud, steppes, étés chauds - par exemple, la région méditerranéenne et certaines régions de l'Australie
	Cfa	neige, entièrement humide, étés chauds - par exemple, certaines régions du Canada et du nord de l'Asie centrale

Données utilisées dans la Figure 1 (15 sources différentes)

Étape du cycle de vie	Référence	Valeur
Utilisation	Sharma et al., 2011	80 %
Utilisation	Blengini & Di Carlo, 2010	54 %
Utilisation	Ruuska & Häkkinen, 2015	45 %
Utilisation	Ochsendorf et al., 2011	88,5 %
Utilisation	Rossi et al., 2012	62 %
Utilisation	Chou & Yeh, 2015	89,0 %
Utilisation	John, S., et al. 2008	74,2 %
Utilisation	Ruuska & Häkkinen, 2015	85 %
Utilisation	Ruuska & Häkkinen, 2015	61 %
Utilisation	Ochsendorf et al., 2011	91 %
Utilisation	Ghattas et al., 2013	90 %
Utilisation	Ghattas et al., 2013	50 %
Utilisation	Säynäjoki et al., 2017	85 %
Utilisation	Chou & Yeh, 2015	89,5 %
Utilisation	Marceau et al., 2012	61,6 %
Utilisation	John, S., et al. 2008	79,1 %
Utilisation	Biswas, 2014	85 %
Utilisation	Junnila et al., 2006	88 %
Utilisation	Sharma et al., 2011	85 %
Utilisation	Blengini & Di Carlo, 2010	80 %
Utilisation	Ruuska & Häkkinen, 2015	76 %
Utilisation	Ochsendorf et al., 2011	93,0 %

Étape du cycle de vie	Référence	Valeur
Utilisation	Rossi et al., 2012	98 %
Utilisation	Chou & Yeh, 2015	90,1 %
Utilisation	John, S., et al. 2008	84,0 %
Construction	Sharma et al., 2011	0,4 %
Construction	Blengini & Di Carlo, 2010	1,00 %
Construction	Rossi et al., 2012	1,00 %
Construction	Guggemos & Horvath, 2005	0,40 %
Construction	Chou & Yeh, 2015	1,3 %
Construction	Grann, 2013	1,8 %
Construction	Ruuska & Häkkinen, 2015	1 %
Construction	Nässen et al., 2007	0,8 %
Construction	Chou & Yeh, 2015	3,2 %
Construction	Marceau et al., 2012	0,4 %
Construction	Biswas, 2014	2,2 %
Construction	Junnila et al., 2006	2 %
Construction	Grann, 2013	1,9 %
Construction	Sharma et al., 2011	11 %
Construction	Blengini & Di Carlo, 2010	2 %
Construction	Rossi et al., 2012	20 %
Construction	Guggemos & Horvath, 2005	11 %
Construction	Chou & Yeh, 2015	5,0 %
Construction	Grann, 2013	2,0 %



Étape du cycle de vie	Référence	Valeur
Production	Blengini & Di Carlo, 2010	20 %
Production	Ruuska & Häkkinen, 2015	24 %
Production	Ochsendorf et al., 2011	6,9 %
Production	Chou & Yeh, 2015	3,6 %
Production	John, S., et al. 2008	15,8 %
Production	Grann, 2013	13,7 %
Production	Ruuska & Häkkinen, 2015	15 %
Production	Ruuska & Häkkinen, 2015	40 %
Production	Ochsendorf et al., 2011	9 %
Production	Nässen et al., 2007	11 %
Production	Ghattas et al., 2013	10 %
Production	Ghattas et al., 2013	50 %
Production	Chou & Yeh, 2015	6,0 %
Production	Marceau et al., 2012	38,0 %
Production	John, S., et al. 2008	19,8 %
Production	Biswas, 2014	12 %
Production	Junnila et al., 2006	10 %
Production	Grann, 2013	18,1 %
Production	Blengini & Di Carlo, 2010	46 %
Production	Ruuska & Häkkinen, 2015	55 %

Étape du cycle de vie	Référence	Valeur
Production	Ochsendorf et al., 2011	11,2 %
Production	Chou & Yeh, 2015	8,4 %
Production	John, S., et al. 2008	23,8 %
Production	Grann, 2013	22,4 %
Fin de vie	Ochsendorf et al., 2011	0,1 %
Fin de vie	Rossi et al., 2012	0,20 %
Fin de vie	Chou & Yeh, 2015	1,3 %
Fin de vie	John, S., et al. 2008	0,2 %
Fin de vie	Grann, 2013	1,4 %
Fin de vie	Ochsendorf et al., 2011	0,2 %
Fin de vie	Chou & Yeh, 2015	1,3 %
Fin de vie	John, S., et al. 2008	1,1 %
Fin de vie	Junnila et al., 2006	0,5 %
Fin de vie	Grann, 2013	1,4 %
Fin de vie	Ochsendorf et al., 2011	0,2 %
Fin de vie	Rossi et al., 2012	5 %
Fin de vie	Chou & Yeh, 2015	1,3 %
Fin de vie	John, S., et al. 2008	2,0 %
Fin de vie	Grann, 2013	1,5 %



Annexe B

Dans la présente annexe, des calculs et des hypothèses sont présentés pour quatre scénarios d'exploitation forestière tenant compte des différentes incertitudes potentielles liées aux émissions et aux puits de carbone biogénique. Les scénarios sont comparés à un scénario de référence neutre en carbone similaire à ce qui est largement utilisé dans les études ACV et qui reflète un transfert net de carbone biogénique dans l'atmosphère de zéro et un forçage radiatif cumulatif nul sur la durée de vie du produit de bois récolté.

Les échanges de carbone entre les réservoirs de carbone forestiers et l'atmosphère font l'objet d'un suivi annuel dans chaque scénario. Les scénarios 1, 2 et 3 sont isolés et indépendants les uns des autres, tandis que le scénario 4 combine les effets des trois scénarios (1, 2 et 3) :

1. Suppose que le taux de régénération d'une forêt actuellement certifiée par l'Association canadienne de normalisation (CSA), et déclaré supérieur ou égal à 100% est surestimé et s'établit en fait à seulement 90% en raison de pratiques de gestion de renouvellement de forêts insuffisantes.
2. Envisage un résultat pour une forêt boréale où il y a une perte nette permanente de 5% de carbone dans le sol, attribuée à la coupe à blanc.
3. Envisage la conversion d'une forêt naturelle avec un peuplement mature en une forêt gérée avec de courtes rotations afin de maximiser les rendements (perte de 40% du stock de carbone total en surface).
4. Impacts combinés des scénarios 1, 2 et 3.

Les hypothèses utilisées pour établir le scénario de référence et les trois scénarios précités tiennent compte des éléments suivants:

- Aucune forêt ou région du Canada n'est modélisée, mais une forêt archétype censée être représentative est définie.
- On suppose une rotation des récoltes de 60 ans (bien que la plupart des forêts au Canada peuvent être soumises à une période de rotation des récoltes inférieure ou supérieure, les forêts boréales, qui sont la source de la majorité des produits de bois, ont généralement des périodes de rotation des récoltes égales ou supérieures à 60 ans. La sélection d'une période de rotation plus longue aurait pour effet de réduire les émissions biogéniques nettes pour tous les scénarios envisagés et une période de rotation des récoltes plus courte augmenterait les émissions biogéniques nettes).
- La durée de vie de la période d'évaluation de l'ACV du carbone biogénique sélectionnée était de 100 ans. C'est plus long que la durée de vie typique d'un bâtiment et cela offre suffisamment de temps pour prendre en compte la dynamique entre les différents réservoirs de carbone forestier. Cela correspond également à la durée pendant laquelle les coefficients de potentiel de réchauffement planétaire sont généralement comparés dans les scénarios d'atténuation.
- Les transferts de carbone sont modélisés entre les bassins de carbone hors sol, les bassins de carbone des produits de bois récolté (PBR) et l'atmosphère pour chaque scénario. Le scénario de carbone du sol prend également en compte les échanges du réservoir de carbone organique du sol vers l'atmosphère.
- On suppose que le carbone biogénique transféré aux produits de bois récolté de longue durée (PBR LD) a une demi-vie de 60 ans, ce qui signifie qu'environ la moitié du carbone devrait être libérée dans l'atmosphère après 60 ans. Le carbone biogénique transféré aux produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) devrait avoir une demi-vie de cinq ans, ce qui signifie qu'environ la moitié du carbone serait libérée dans l'atmosphère après cinq ans. La sélection de demi-vies plus longues réduirait les émissions biogéniques nettes, tandis que des demi-vies plus courtes augmenteraient les émissions biogéniques nettes.



La simulation du **scénario de référence** comprend:

- La répartition initiale suivante du carbone forestier biogénique total dans différents réservoirs de carbone avant la récolte (année 0): 14,9% dans la biomasse aérienne, 67,6% dans les réservoirs de carbone du sol (COS), 5,1% dans les produits du bois récolté et les 12,4% restants dans les réservoirs de biomasse souterraine, le bois mort et la litière. Les transferts de carbone ne sont pas simulés pour ces réservoirs de carbone restants car ils sont supposés être stables pendant toute la durée de vie de la forêt (c.-à-d. que les effets cumulatifs de forçage radiatif des émissions et des puits sont supposés nuls au cours de la période d'évaluation de 100 ans).
- Lors de la récolte, 72% du carbone forestier de la biomasse aérienne est transféré dans les produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) et de longue durée (PBR LD). On suppose que 50% du carbone forestier récolté est converti en réservoirs de PBR CD, et que 50% du carbone forestier récolté est converti en réservoirs de PBR LD. Ce ratio est conservateur en ce sens que la proportion envoyée aux PBR LD est nettement supérieure à la moyenne nationale et que la plus grande proportion envoyée aux PBR LD augmente le potentiel de puits de carbone des produits de bois récoltés. Les forêts avec une proportion plus élevée de PBR LD réduiraient les émissions nettes biogéniques ou augmenteraient les puits, tandis que les forêts ayant une proportion plus faible de PBR LD augmenteraient les émissions nettes biogéniques ou réduiraient les puits.
- Le taux de croissance de la biomasse aérienne est défini de manière à ce qu'après une période de rotation de la récolte de 60 ans, la biomasse accumulée soit égale à sa valeur avant la récolte (c'est-à-dire l'année 0). Cette hypothèse implique que la forêt atteindrait un niveau de bois marchand après 60 ans qui est équivalent au niveau d'avant la récolte. Un taux de croissance plus élevé réduirait les émissions biogéniques nettes de carbone, tandis qu'une hypothèse utilisant un taux de croissance plus faible augmenterait les émissions nettes de carbone biogénique.

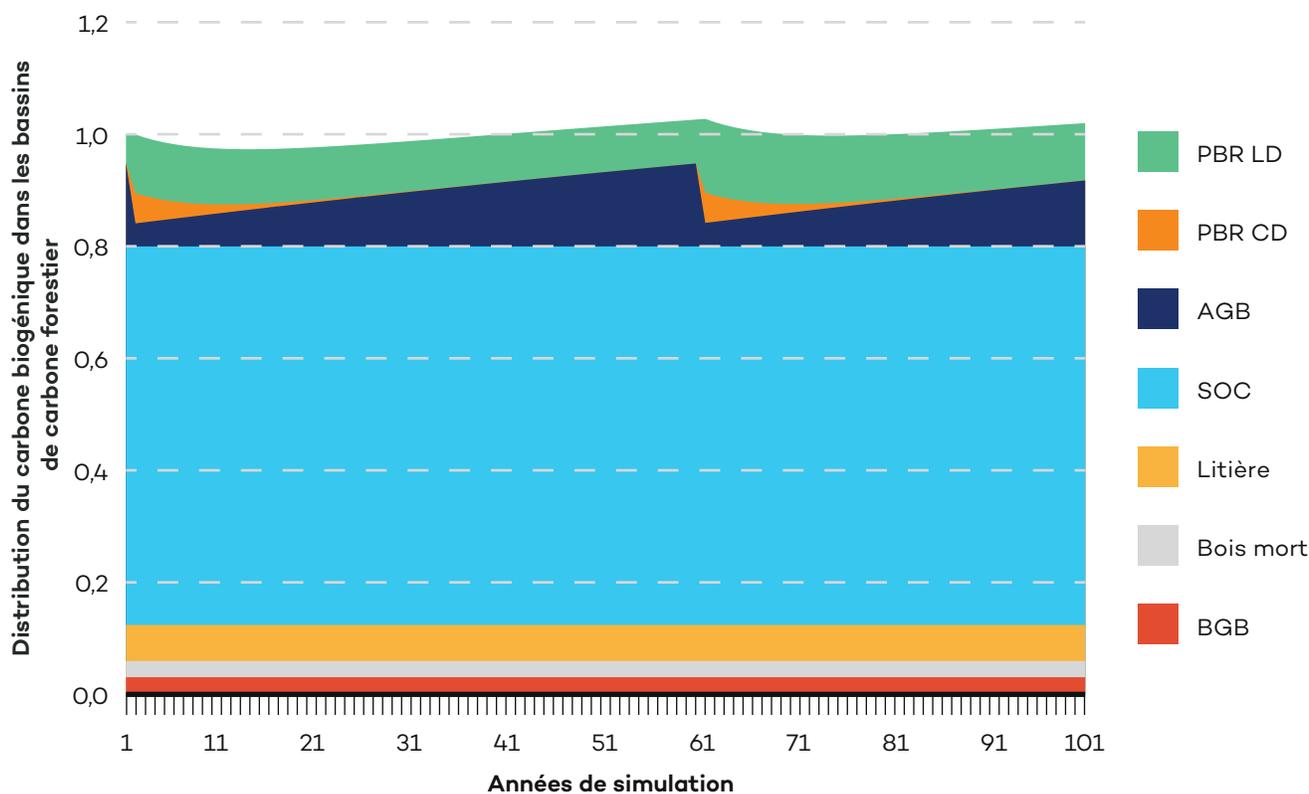


Figure B.1. Bassins de carbone biogénique pour une période de simulation de 100 ans utilisant le scénario de référence



Il convient de noter que, lorsque le carbone biogénique cumulatif pour tous les réservoirs de carbone forestier est inférieur à 1 à la figure B.1, cela représente des émissions nettes dans l'atmosphère, tandis que lorsque le carbone biogénique cumulatif est supérieur à 1, cela indique un puits net de carbone forestier. Pendant la période de rotation de 60 ans, les émissions nettes et les puits nets varient mais le forçage radiatif total représenté par le potentiel de réchauffement planétaire (GWP) des émissions et des puits tout au long de la période d'évaluation de 100 ans, est égal à zéro (c.a.d. la zone blanche sous la ligne de valeur 1 qui représente les émissions dans l'atmosphère est à peu près égale à la superficie occupée par les réservoirs de carbone forestier qui est supérieure à 1).

La simulation avec un **scénario de taux de régénération de 90%** comprend:

- La même distribution initiale du carbone forestier biogénique total que le scénario de référence: 14,9% dans la biomasse aérienne, 67,6% dans les réservoirs de carbone du sol, 5,1% dans les produits du bois récolté, et les 12,4% restants dans les réservoirs de biomasse souterraine, de bois mort et de litière.
- Les mêmes hypothèses de récolte que le scénario de référence. La récolte a pour résultat le transfert de 72% du carbone de la biomasse aérienne vers les produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) et de longue durée (PBR LD). On suppose que 60% du carbone forestier récolté est converti en PBR CD, et 40% du carbone forestier récolté est converti en PBR LD.
- Un taux de croissance de la biomasse aérienne plus bas que dans le scénario de référence, à 90% de la valeur de référence, défini de manière à ce que, après la période de rotation des récoltes de 60 ans, la biomasse aérienne accumulée représente 90% de sa valeur avant la récolte (c'est-à-dire l'année 0). Cette hypothèse repose sur la démonstration que certaines forêts exploitées ont subi des pertes de carbone permanentes en raison de la conversion de certaines surfaces en routes d'accès et zones d'opération, ainsi que d'un volume de bois marchand inférieur à celui des récoltes précédentes (GLOBE Advisors, 2017).

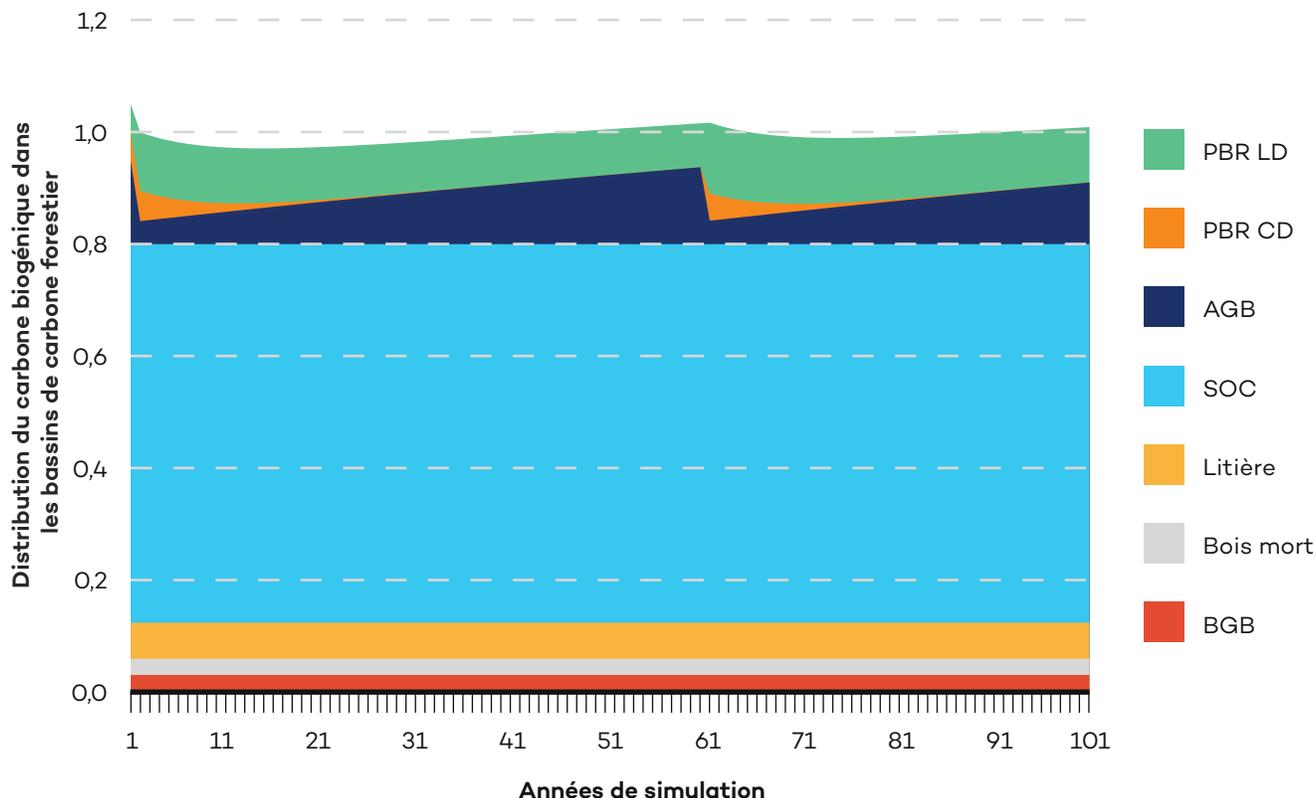


Figure B.2. Scénario d'un taux de régénération de 90 % : réservoirs de carbone biogénique pour une période de simulation de 100 ans



La simulation avec le **scénario de la perte de carbone organique du sol** comprend :

- La même distribution initiale de carbone forestier biogénique total que le scénario de référence: 14,9% dans la biomasse aérienne, 67,6% dans les réservoirs de carbone du sol, 5,1% dans les produits du bois récolté, et les 12,4% restants dans les réservoirs de biomasse souterraine, de bois mort et de litière.
- Les mêmes hypothèses de récolte que le scénario de référence. La récolte a pour résultat le transfert de 72% du carbone de la biomasse aérienne vers les produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) et de longue durée (PBR LD). On suppose que 60% du carbone forestier récolté est converti en PBR CD, et 40% du carbone forestier récolté est converti en PBR LD.
- Le même taux de croissance de la biomasse aérienne que dans le scénario de référence - défini de manière à ce qu'après une période de rotation des récoltes de 60 ans, la biomasse aérienne accumulée est égale à sa valeur avant la récolte (c'est-à-dire l'année 0).
- L'hypothèse que 5% du réservoir total de carbone organique du sol est perdu de façon permanente au cours des cinq premières années suivant la récolte. Cette hypothèse repose sur des estimations tirées d'études selon lesquelles l'exploitation forestière peut réduire considérablement le carbone total dans les sols forestiers tempérés (James & Harrison, 2016; Nave et al., 2010).

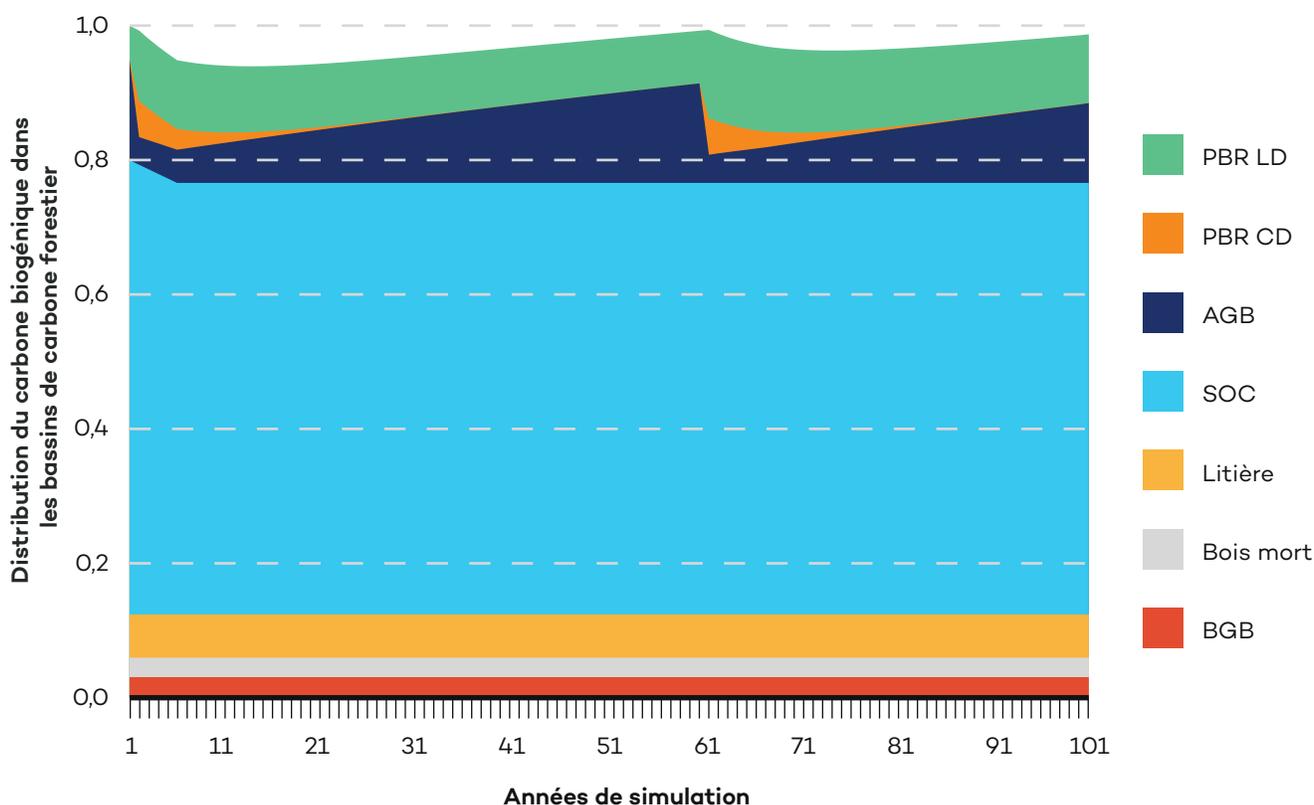


Figure B.3. Scénario de la perte de carbone organique dans le sol : Bassins de carbone biogénique pour une période de simulation de 100 ans

Il faut bien noter que le carbone biogénique cumulatif pour tous les réservoirs de carbone forestier est toujours inférieur à 1, indiquant des émissions nettes dans l'atmosphère. En fait, le carbone forestier total, y compris celui contenu dans les produits de bois récolté, ne retrouve jamais ses niveaux initiaux et se situe à 98% à la fin de la période d'évaluation de 100 ans. Cela conduit à un potentiel de réchauffement planétaire net sur cette période.



Le scénario de simulation de la **conversion d'une forêt naturelle** comprend :

- La répartition initiale suivante du carbone forestier biogénique total dans différents réservoirs de carbone avant la récolte (année 0) : 23,4 % dans les réservoirs de la biomasse aérienne, 63,8 % dans les réservoirs de carbone du sol et 12,9 % restants dans la biomasse souterraine, le bois mort et la litière. Les transferts de carbone ne sont pas simulés pour ces réservoirs de carbone restants, car ils sont supposés rester stables tout au long de la durée de vie de la forêt (autrement dit, les effets cumulatifs de forçage radiatif des émissions et des puits sont supposés nuls au cours de la période d'évaluation de 100 ans).
- La récolte initiale a pour résultat que 82 % du carbone de la biomasse aérienne est transféré vers les produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) et de longue durée (PBR LD). On suppose que 50 % du carbone forestier récolté est converti en PBR CD et 50 % du carbone forestier récolté est converti en PBR LD. Ce ratio est conservateur en ce sens que la proportion attribuée aux PBR LD est considérablement supérieure à la moyenne nationale et que la plus grande proportion envoyée aux PBR LD augmente le potentiel de puits de carbone des produits de bois récolté. Les taux de récolte ultérieurs ont pour résultat le transfert de 72 % du carbone total de la biomasse aérienne vers les produits de bois récolté. Les forêts avec une proportion plus élevée de PBR LD réduiraient les émissions nettes biogéniques, tandis que les forêts ayant une proportion plus faible de PBR LD augmenteraient les émissions nettes biogéniques.
- Le taux de croissance de la biomasse aérienne est égal à celui du scénario de référence. Après la période de rotation des récoltes de 60 ans, la biomasse aérienne accumulée est égale à 60 % de sa valeur avant la récolte. Cette hypothèse repose sur des estimations du carbone absorbé par les arbres en croissance après la récolte d'un peuplement mature (GLOBE Advisors, 2017). Une hypothèse d'un taux de croissance plus élevé réduirait les émissions de carbone biogénique nettes, tandis qu'une hypothèse de taux de croissance plus faible augmenterait les émissions nettes de carbone biogénique.

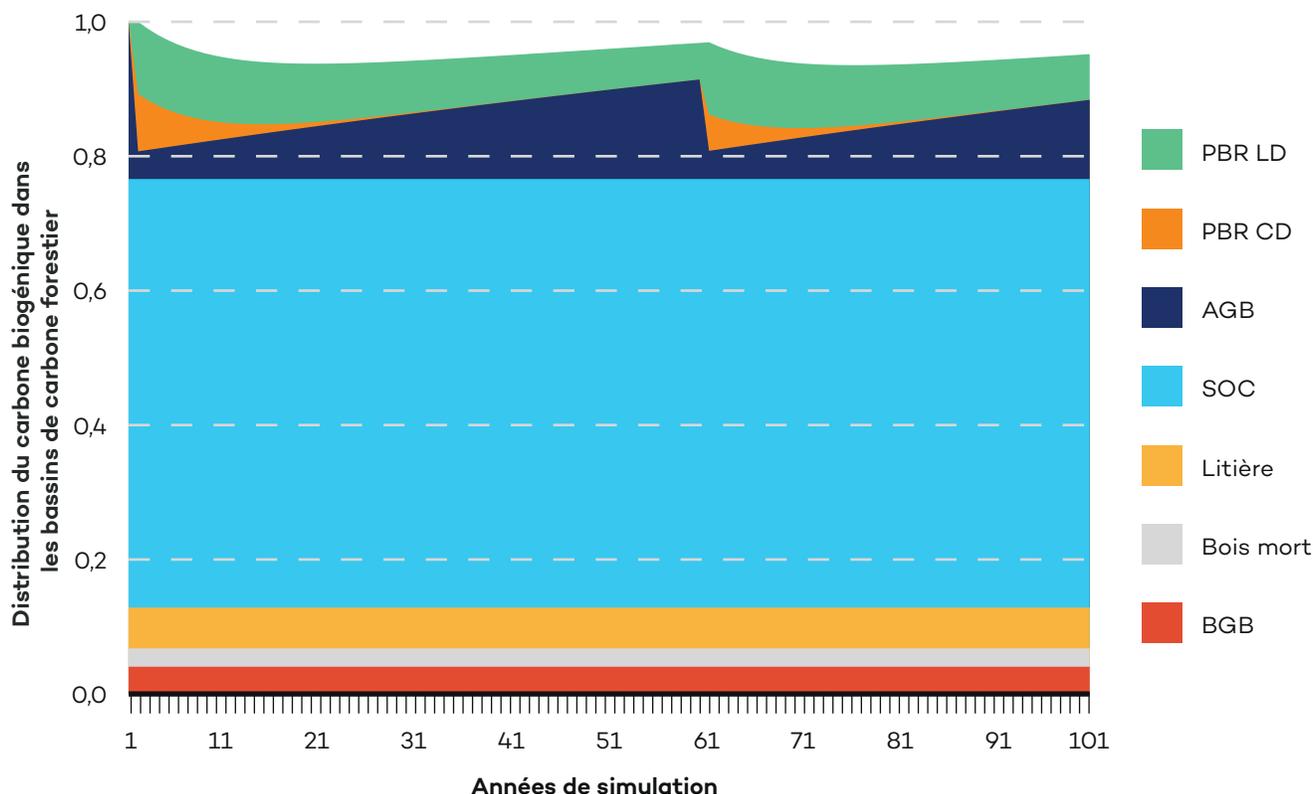


Figure B.4. Scénario de la conversion d'une forêt naturelle : réservoirs de carbone biogénique pour une période de simulation de 100 ans



Il est bon de noter que le carbone biogénique cumulatif pour l'ensemble des réservoirs de carbone forestier est toujours inférieur à 1, indiquant des émissions nettes dans l'atmosphère. En fait, le carbone forestier total, y compris celui contenu dans les produits de bois récolté, ne retrouve jamais ses niveaux initiaux et se situe à 94% à la fin de la période d'évaluation de 100 ans. Cela conduit à un potentiel de réchauffement planétaire net sur cette période.

La simulation du **scénario combiné comprend les hypothèses combinées des scénarios de taux de régénération de 90 %, de perte de carbone organique du sol et de conversion d'une forêt naturelle :**

- La répartition initiale suivante du carbone forestier biogénique total dans différents réservoirs de carbone avant la récolte (année 0) : 23,4 % dans la biomasse aérienne, 63,8 % dans les réservoirs de carbone organique du sol (COS) et les 12,9 % restants dans la biomasse souterraine, le bois mort et la litière. Les transferts de carbone ne sont pas simulés pour ces réservoirs de carbone, car ils sont supposés rester stables tout au long de la vie de la forêt (autrement dit, les effets cumulatifs de forçage radiatif des émissions et des puits sont supposés nuls sur une période d'évaluation de 100 ans).
- La récolte initiale a pour résultat que 82 % du carbone de la biomasse aérienne est transféré vers les produits de bois récolté de courte durée (PBR CD) et de longue durée (PBR LD). On suppose que 50 % du carbone forestier récolté est converti en PBR CD, et 50 % du carbone forestier récolté est converti en PBR LD. Ce ratio est conservateur en ce sens que la proportion attribuée aux PBR LD est considérablement supérieure à la moyenne nationale et que la plus grande proportion envoyée aux PBR LD augmente le potentiel de puits de carbone des produits de bois récolté. Les taux de récolte ultérieurs ont pour résultat le transfert de 72 % du carbone total de la biomasse aérienne vers les produits de bois récolté. Les forêts avec une proportion plus élevée de PBR LD réduiraient les émissions nettes biogéniques, tandis que les forêts ayant une proportion plus faible de PBR LD augmenteraient les émissions nettes biogéniques.
- Le taux de croissance de la biomasse aérienne est égal au taux de croissance du scénario de référence. Après la période de rotation des récoltes de 60 ans, la biomasse aérienne accumulée correspond à 60 % de sa valeur avant la récolte. Pour les récoltes ultérieures après 60 ans, le taux de croissance est équivalent à 90 % de celui du scénario de référence.
- On suppose que 5 % du réservoir total de carbone organique du sol est perdu de façon permanente au cours des cinq premières années suivant la récolte.

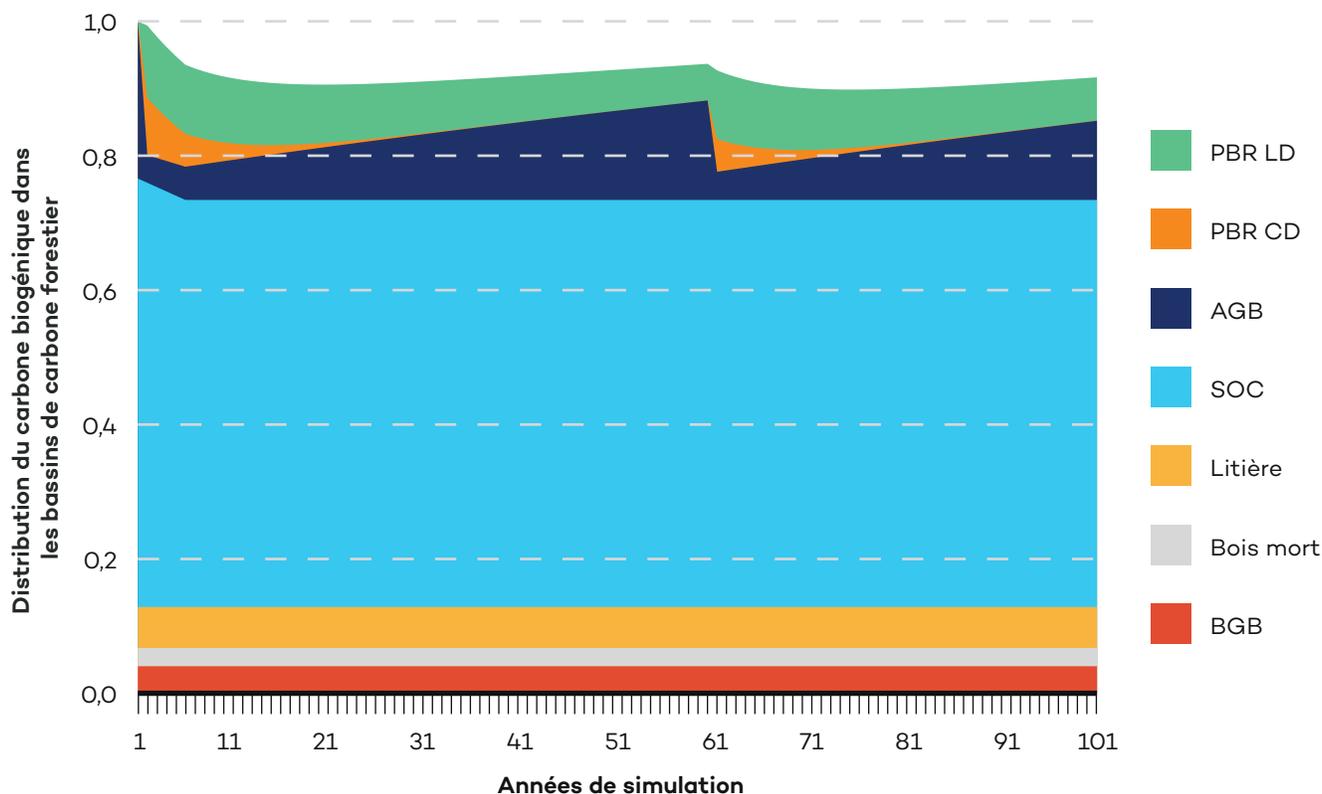


Figure B.5. Scénario combiné (scénarios 1, 2 et 3 ensemble) : Réservoirs de carbone biogénique pour une période de simulation de 100 ans

Il convient de noter que lorsque le carbone biogénique cumulatif pour tous les réservoirs de carbone forestier est inférieur à 1, cela représente des émissions nettes dans l'atmosphère, tandis que lorsque le carbone biogénique cumulatif pour tous les réservoirs de carbone forestier est supérieur à 1, cela signifie un puits net de carbone forestier. Bien que les émissions nettes et les puits nets varient au cours de la période de simulation de 100 ans, le forçage radiatif global tel que représenté par le potentiel de réchauffement de la planète est négatif sur l'ensemble de la période d'évaluation de 100 ans.

Le scénario de référence et les quatre scénarios ne donnent qu'un aperçu de la gamme possible des impacts due aux incertitudes identifiées et ne sont pas représentatifs des résultats probabilistes, ni des conditions moyennes ou spécifiques des forêts aménagées du Canada. Pour chaque scénario, il est possible d'estimer les flux de carbone annuels associés à tous les produits de bois récoltés (PBR) en attribuant la variation annuelle nette anticipée des émissions de carbone biogénique sur une base de pondération égale pour tous les PBR.

Dans cette étude, nous avons calculé les facteurs GWP_{bio} à l'aide des simulations identifiées ci-dessus et en tenant compte des effets de forçage radiatif sur une période de 100 ans. La simulation ne prend pas en compte d'autres GES pouvant éventuellement provenir de la combustion ou de la dégradation anaérobie du carbone biogénique, notamment le dioxyde d'azote et le méthane, mais ceux-ci sont généralement pris en compte dans les études d'ACV.

Le facteur GWP_{bio} est calculé en faisant la moyenne des émissions nettes (positives) ou des puits (négatifs) de carbone biogénique dans l'atmosphère (c'est-à-dire qui ne figurent dans aucun des réservoirs de carbone forestier indiqués dans chaque figure) sur la période de simulation de 100 ans. Des facteurs GWP_{bio} distincts pourraient être calculés pour les PBR de courte durée et de longue durée; cependant, une moyenne est utilisée qui peut être appliquée à la fois au carbone incorporé dans les produits de construction en bois et à la bioénergie utilisée pour



fabriquer ces produits. En outre, les scénarios envisagent tous une division entre les PBR de courte durée de 60 % et ceux de longue durée de 40 %, ce qui signifie que la valeur attribuée aux PBR de longue durée est nettement supérieure à la moyenne nationale. Leur combinaison témoigne également du fait que ces types de produit ne sont souvent pas substituables; par exemple, sur le bois marchand acheminé vers la scierie, environ la moitié seulement est convertie en PBR de longue durée (Global Advisors, 2017).

Les facteurs GWP_{bio} présentés dans le tableau B.1 sont calculés en faisant la somme des émissions nettes dans l'atmosphère et en la divisant par le carbone net séquestré dans les PBR sur une période de 100 ans. Cela correspond à la zone blanche sous la ligne de 1 dans chaque figure, divisée par la surface totale des produits de bois récoltés de courte et de longue durée.

Tableau B.1. Facteur GWP_{bio} estimé pour quatre scénarios de carbone biogénique

Scénario	GWP_{bio}
Niveau de référence - Carbone neutre	0
Taux de régénération de 90 % (scénario 1)	0,0696
Perte de carbone dans le sol (scénario 2)	0,293
Conversion de forêt naturelle (scénario 3)	0,509
Combiné (Scénarios 1, 2 et 3)	0,835

Les facteurs GWP_{bio} peuvent être utilisés pour estimer les émissions de carbone biogénique et ajuster les émissions sur l'ensemble du cycle de vie associées à tout produit du bois qui ne les a pas incluses. Des ajustements peuvent être apportés aux émissions du cycle de vie associées au carbone incorporé dans le produit lui-même, mais également celles liées à la biomasse de bois brûlée pour produire de l'énergie. Les données nécessaires pour trois produits sont résumées dans le tableau B.2 ci-dessous. Les informations sur les produits ont été recueillies à partir des rapports d'évaluation du cycle de vie du berceau à la porte de l'Athena Sustainable Materials Institute (2018) pour chaque produit en bois, y compris le bois d'œuvre, le revêtement en contreplaqué de bois, les panneaux à copeaux orientés et le bois lamellé-collé (Glulam).

Tableau B.2. Masse du produit et masse de carbone associée au produit et à la biomasse de bois consommée pour la production d'énergie

Produit	A	B (A*0.5)	C
	Masse du produit (kg)	Masse de carbone associée au bois (kg C)	Biomasse de bois nécessaire à la production (kg C) ¹ (en supposant 20 kg / MJ et une densité de carbone de 0,5 kg C / kg de bois)
1 m ³ de sections de lamellé collé (GLULAM)	417	209	5,4
1 m ³ Panneaux à copeaux orientés (OSB)	562	281	62,8
1 m ³ de bois de petite dimension	417	209	25,4
1 m ³ de revêtement en contreplaqué de bois	428	214	35,8



L'intensité totale des émissions intrinsèques calculées pour chaque produit est fournie dans le tableau B.3 pour le scénario de conversion d'une forêt naturelle où le GWP_{bio} est égal à 0,509.

Tableau B.3. Intensités d'émission ajustées incluant les émissions biogéniques incorporées ($GWP = 0,509$) pour quatre produits du bois

Product	D	E (B + C) * (44/12) * 0,509	F (E/A)	G ((D+E)/A)
	Émissions du berceau à la porte (kgCO ₂ e)	Émissions biogéniques incorporées où $GWP_{bio} = 0,509$	Intensité d'émission biogénique incorporée (kgCO ₂ e)	Intensité totale combinée des émissions par kg de produit (kgCO ₂ / kg de produit)
1 m ³ de sections de lamellé collé (GLULAM)	148	399	0,957	1,31
1 m ³ Panneaux à copeaux orientés (OSB)	137	641	1,14	1,39
1 m ³ de bois de petite dimension	48,7	436	1,05	1,16
1 m ³ de revêtement en contreplaqué de bois	69,4	466	1,09	1,25

Le calcul du tableau B.3 peut être répété pour chaque produit afin d'obtenir la figure B.6 ci-dessous.

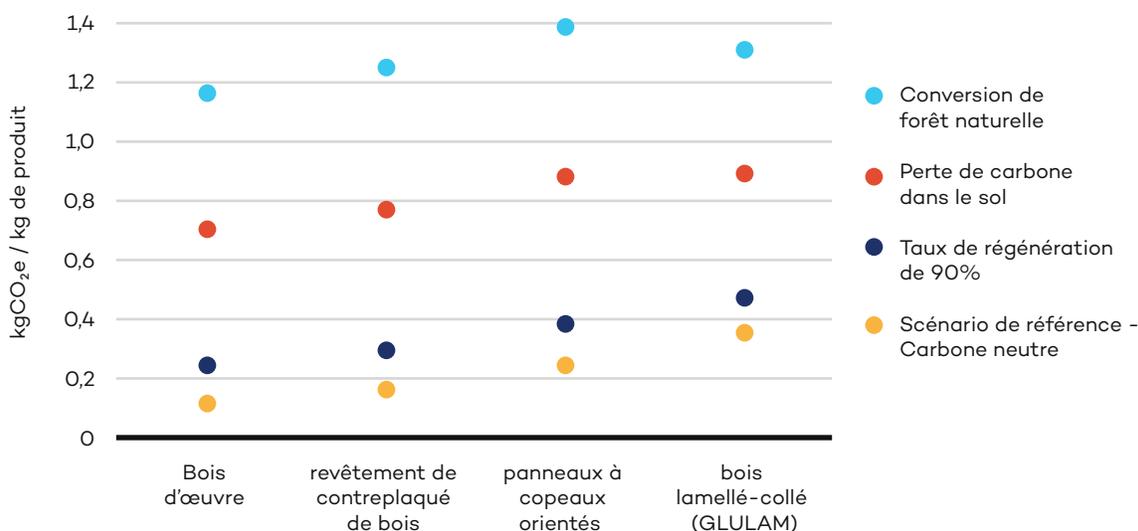


Figure B.6. Émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie du berceau à la porte pour quatre produits du bois selon différents scénarios

La figure B.6 indique que les émissions incorporées (du berceau à la porte) peuvent être multipliées par des facteurs de 1,3 à près de 10 fois lorsque les émissions de carbone biogénique sont incluses, selon le scénario et le produit. Afin d'évaluer les impacts sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments, une étude de Morrison Hershfield (Morrison Hershfield, Dakota du Nord) a été choisie pour comparer la construction d'immeubles résidentiels en bois et en béton de hauteur moyenne. Cette ACV comparait les résultats pour l'ensemble du bâtiment entre deux versions d'ossature structurelle, l'une en bois et l'autre en béton, et dont les besoins en énergie étaient équivalents.



Cet exemple est typique des travaux d'ACV retrouvés dans la littérature et estime que les émissions du cycle de vie du berceau à la porte pour une construction en bois ont un potentiel de réchauffement planétaire (GWP) inférieur de 36 % à celui d'une construction en béton. Cette ACV suppose que les émissions de carbone biogénique sont neutres en carbone et ne contribuent pas au GWP. Les trois principales composantes en bois inclus dans un tel immeuble sont des sections de bois lamellé-collé (GLULAM), des panneaux à copeaux orientés (OSB) et du bois d'œuvre. Sur la base de la masse totale de ces composantes, de l'intensité d'émission calculée et des facteurs d'émission de carbone biogénique associés à chaque scénario, les émissions supplémentaires de carbone biogénique de bâtiments en béton et en bois peuvent être calculées.

Tableau B.4. Calcul des émissions biogéniques incorporées (construction de béton et de bois) avec le scénario de la conversion d'une forêt naturelle ($GWP_{bio} = 0,509$)

Product	H		I (H * A)/1000		J (I * F) / 1000	
	Nombre de composantes		Masse du produit		Émissions biogéniques incorporées (tonnes) Où $GWP_{bio} = 0,509$	
	Bâtiment en béton	Bâtiment en bois	Bâtiment en béton	Bâtiment en bois	Bâtiment en béton	Bâtiment en bois
Sections Glulam (m ³)	0	214	0	89	0	85,4
Panneaux à copeaux orientés (OSB) (9mm)	3 047	39 558	15,4	200	17,6	229
Bois de petite dimension (m ³)	12	344	5,0	143	5,2	150
TOTAL pour tous les produits du bois	-	-	20,4	433	22,8	464

Les émissions biogéniques incorporées peuvent ensuite être comparées aux émissions totales calculées pour les différentes étapes et processus du cycle de vie. Le tableau B.5 ci-dessous identifie les émissions sur l'ensemble du cycle de vie rapportées dans l'étude ACV, par rapport aux émissions biogéniques calculées pour chacun des quatre scénarios.

Tableau B.5. Émissions de constructions en béton et en bois, selon l'analyse du cycle de vie

Émissions incorporées	Référence Carbone neutre		90 % Taux de régénération		Perte de carbone dans le sol		Conversion de forêt naturelle		Combinés	
	Béton	Bois	Béton	Bois	Béton	Bois	Béton	Bois	Béton	Bois
Biogénique	0	0	3	57	13	261	23	464	37	762
Fabrication	1 635	1 048	1 635	1 048	1 635	1 048	1 635	1 048	1 635	1 048
Construction	85	60	85	60	85	60	85	60	85	60
Utilisation	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900	38 900

La figure B.7 présente les émissions intrinsèques du berceau à la porte pour chacun des quatre scénarios par rapport au scénario de référence (hypothèse de neutralité carbone). Les résultats indiquent que des conditions différentes dans les forêts aménagées peuvent affecter de manière significative les émissions intrinsèques globales, réduisant ainsi l'écart de 36 % entre le béton et le bois dans le scénario de référence, jusqu'à 10 % dans le scénario de conversion d'une forêt naturelle. Le scénario combiné, qui tient compte d'un taux de régénération de 90 %, d'une perte de carbone dans le sol et de la conversion d'une forêt naturelle, renverse en réalité les performances des bâtiments, de sorte que le bâtiment en bois génère des émissions du berceau à la porte supérieures de 6 % à celles générées par le bâtiment en béton.

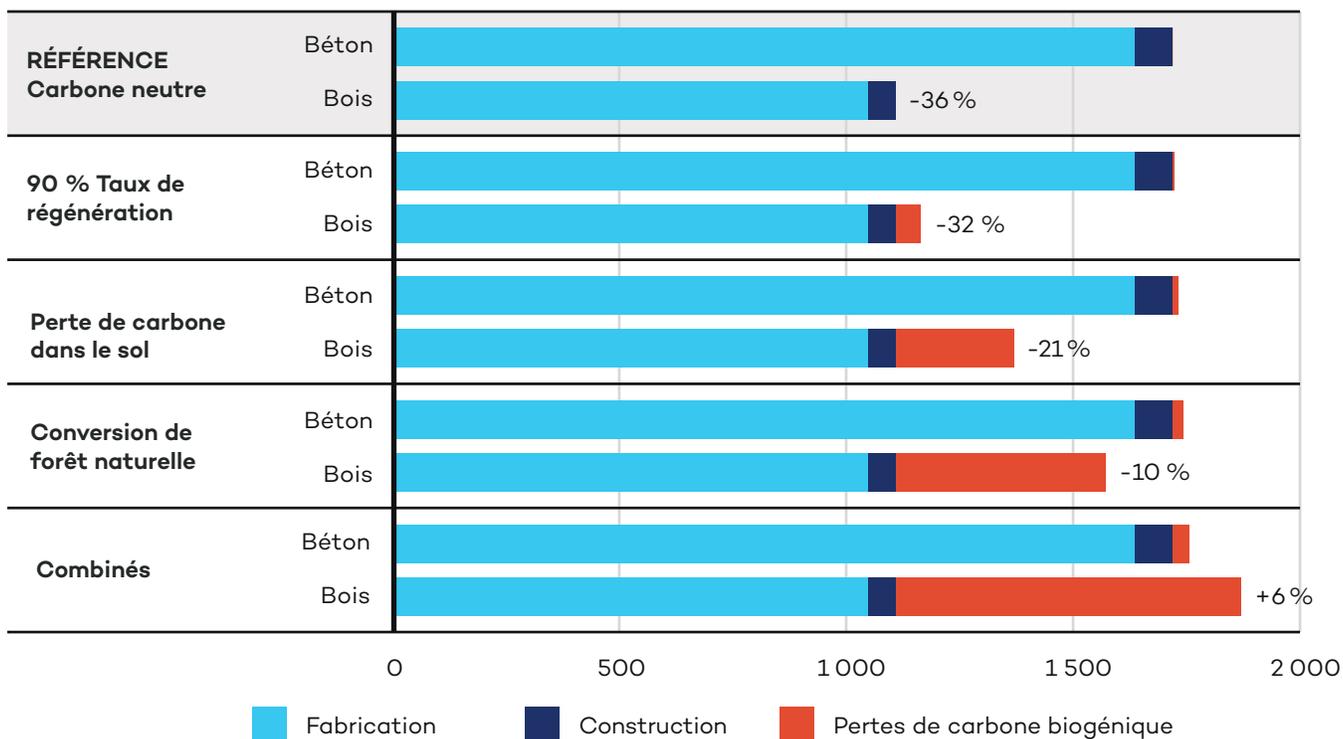


Figure B.7. Prise en compte des émissions incorporées dans les bâtiments du berceau à la porte pour plusieurs hypothèses du cycle du carbone biogénique par rapport à une valeur de référence neutre en carbone

La figure B.8 indique que, lorsque l'on considère la phase d'utilisation du bâtiment, la différence entre les types de construction peut varier considérablement. Dans le cas du bâtiment de l'étude situé à Québec, la fraction des émissions du stade de l'utilisation est très élevée (près de 95 %) et l'impact est négligeable, mais pour des bâtiments à efficacité opérationnelle supérieure ou situés dans des climats plus modérés, l'impact peut être important lorsque les émissions au stade d'utilisation deviennent une fraction plus importante des émissions totales.

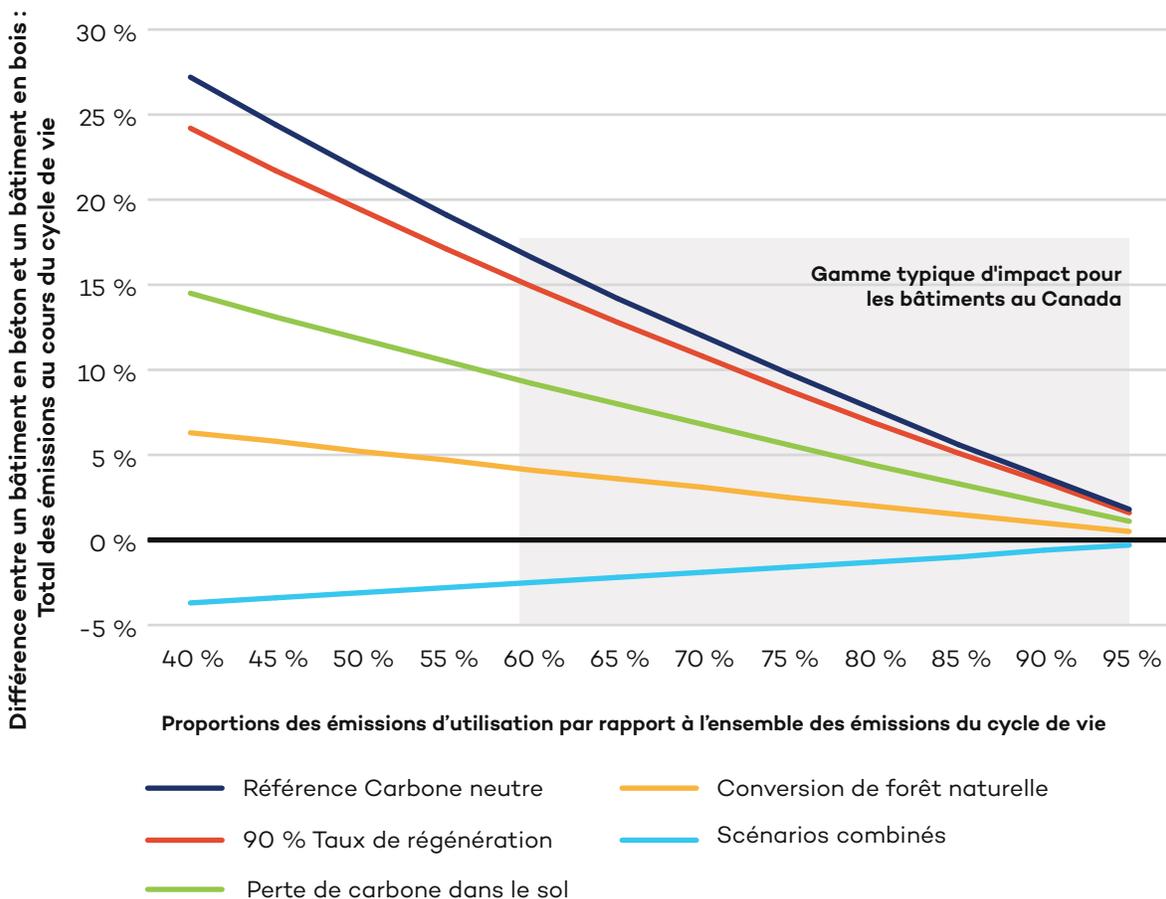


Figure B.8 Prise en compte des émissions intrinsèques du berceau au stade d'utilisation pour plusieurs hypothèses de cycle de carbone biogénique, par rapport à un scénario de référence neutre en carbone

©2019 International Institute for Sustainable Development (IISD)
Publié par L'International Institute for Sustainable Development

Siège social

111, av. Lombard, bur. 325
Winnipeg, Manitoba
Canada R3B 0T4

Tél : +1 (204) 958-7700

Site web : www.iisd.org

Twitter : [@IISD_news](https://twitter.com/IISD_news)



[iisd.org](http://www.iisd.org)