

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de Génie

Département de génie civil et de génie du bâtiment

Développement d'une ACV conséquentielle
dynamique : augmentation de la pénétration du
bois dans le secteur de la construction

Thèse de doctorat

Spécialité : génie civil

Sylvain CORDIER

Sherbrooke (Québec) Canada

Mars 2023

Membres du Jury :

Pr Ben AMOR
Directeur

Pr Pierre BLANCHET
Co-Directeur

François ROBICHAUD
Co-Directeur

Pr Hubert CABANA
Membre interne

Pr Anne VENTURA
Membre externe

Bruno GAGNON
Membre externe

RESUME

La fabrication des produits en bois peut avoir un impact plus faible sur le changement climatique que d'autres matériaux de construction, et leur teneur en carbone peut faire des bâtiments un puits de carbone temporaire. Les avancées technologiques, la formation, et la synergie qui se mettent en place entre les acteurs industriels et institutionnels participent aussi à l'acceptation du bois dans les bâtiments. Avec le nombre croissant de publications montrant que l'utilisation du bois dans la construction peut être une option écologique, les décideurs pourraient s'orienter vers une utilisation à grande échelle. Cependant, l'utilisation à grande échelle des produits du bois dans les bâtiments nécessite une meilleure compréhension de ses conséquences pour soutenir les politiques de lutte contre le changement climatique (CC). C'est pourquoi un cadre d'évaluation de l'utilisation croissante du bois dans la construction est développé dans cette thèse. Il se fonde sur une modélisation prospective d'analyse des flux de matière (AFM) pour supporter la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV). Le secteur de la construction non résidentielle (NR) en bois au Québec est un bon exemple car les gouvernements (provincial et fédéral) cherchent à l'accroître. En 2008, l'industrie forestière subit une crise suite à la baisse de ses exportations. Puis, à la suite de stratégies successives, le gouvernement québécois propose la première version de la charte du bois en 2013. Elle représente son engagement à augmenter l'utilisation du bois dans la construction pour soutenir l'industrie forestière et de la construction, ainsi que pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les bâtiments résidentiels unifamiliaux étant majoritairement faits en bois, l'engagement vise la construction non résidentielle et multifamiliale.

Les ACV sur le bois ont des lacunes qui limitent la représentation et l'analyser des conséquences de son utilisation croissante à l'échelle d'une région pour un stock de bâtiment. Premièrement, la littérature suggère que la substitution de matériaux de construction conventionnels par des produits en bois est souhaitable pour atténuer les émissions de GES. Elle présente la différence de l'impact au CC qui est attribuable à la comparaison de deux bâtiments, structures, ou produits. Les autres impacts environnementaux sont moins abordés. Le résultat d'une évaluation à l'échelle d'une structure spécifique ou d'un bâtiment est difficilement applicable à d'autres cas d'études ou extrapolable à l'échelle d'une région pour un stock de bâtiments hétérogènes. De plus, ces évaluations ne permettent pas de considérer l'impact des processus impliqués ou évités en conséquence de cette substitution. L'identification de ces processus est un défi en ACV conséquentielle (ACV-C). Enfin, une utilisation du bois à grande échelle implique de comprendre le niveau de récolte par rapport disponibilité de la ressource, mais la quantification des flux de matière dans le secteur du bâtiment est limitée aux bâtiments résidentiels en raison d'un manque de données pour les bâtiments NR.

Dans le but d'améliorer l'évaluation des impacts environnementaux causés par une augmentation de l'utilisation du bois dans la construction, la réponse aux lacunes est organisée de la façon suivante. Premièrement, des paramètres ont dû être élaboré pour estimer et projeter l'utilisation du bois dans les structures NR. Cette estimation sert de flux de référence. Elle est intégrée dans une AFM pour comprendre l'importance de ses valeurs extrêmes par rapport à la récolte totale du bois et la limite de la ressource disponible. Des facteurs de substitution de matières ont été créés à partir de différentes structures de la littérature. Ils sont appliqués à la quantité estimée des produits en bois qui sont utilisés. Enfin, la modélisation dynamique de la croissance des arbres et du roulement de stock permet de créer une cohérence temporelle entre l'inventaire des flux élémentaires et la caractérisation dynamique de l'impact.

Ce projet de recherche apporte plusieurs contributions. Il permet d'estimer l'utilisation croissante du bois dans la construction NR à l'échelle d'une région. Ce type d'estimation est utile pour l'inventaire des flux de référence d'une ACV et pour compléter une AFM. Intégrée dans une AFM, elle permet de supporter l'identification de ressources contraintes dans le cas d'une ACV-C. Ce projet propose également des facteurs de substitution fonctionnelle pour le bois de structure par rapport à une combinaison de l'acier et du béton. Ils sont applicables pour les ACV-C et leur variabilité permet de considérer différentes structures et un intervalle d'impact déplacé pour tous les indicateurs environnementaux afin de faciliter l'interprétation d'une extrapolation à grande échelle. Enfin, le projet met en évidence l'importance relative entre la substitution, les stratégies de fin de vie, et la séquestration temporaire du carbone. Pour une cohorte de bâtiments, le stockage du carbone dans celle-ci est temporel pendant sa durée de vie. Cependant, à la dimension de cohortes successives, le stockage du carbone est plus durable dans le temps, soit pendant la durée de vie du stock. Le cumul du forçage radiatif n'était pas étudié à cette échelle dans le cas d'une régénération forestière après la récolte.

Au Canada, la gestion de la forêt se base sur la possibilité annuelle de coupe qui est déterminée par les gouvernements provinciaux pour s'assurer que les taux de récolte demeurent à des niveaux durables. Cette possibilité forestière traduit le mètre cube de bois disponible pour la récolte. L'AFM a permis de montrer l'importance de l'estimation maximale du volume récolté pour les nouvelles structures par rapport à la possibilité forestière et à l'évolution de la récolte pour les exportations et de la récolte totale. Plus de recherche empirique est nécessaire sur l'analyse des flux du bois des autres marchés. La modélisation de la substitution a permis d'évaluer non seulement le déplacement d'impact sur le CC, mais aussi sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. Les stratégies et politiques qui répondent à l'urgence climatique devraient également prêter attention à la qualité des écosystèmes. Dans le scénario de substitution minimale, le bois évite peu d'acier et de béton. De plus, la production unitaire des grades d'acier et de béton utilisés provoque moins d'impacts que celle des grades utilisés dans les scénarios de substitution moyenne et maximale. Dans ce scénario minimum, c'est la séquestration du carbone qui permet un évitement de l'impact sur le CC. A l'échelle de la structure, le maintien de cet évitement au cours du temps dépendant de la fin de vie de celle-ci. A l'échelle du stock de structure, le maintien de l'évitement dépend de son renouvellement et de la fin de vie des structures. Enfin, utiliser un facteur de caractérisation statique pour le CC pour un inventaire dynamique conséquentielle peut conduire à des conclusions opposées à celles d'un facteur dynamique.

Finalement, différentes pistes d'amélioration sont présentées. En effet, des limites subsistent au niveau de la modélisation ACV et AFM en matière de complétude et de qualité des données ainsi qu'au niveau de la complexité des méthodes d'inventaires et d'impacts dynamiques. Par exemple, la méthode présentée pour estimer la quantité de bois pourrait être comparée à d'autres méthodes, si des données sont disponibles. Une plus grande désagrégation entre les différents produits du bois et leurs secteurs est nécessaire pour mieux cibler les conséquences potentielles de leurs complémentarités, concurrences et dynamiques de marché. Une modélisation plus complète des cycles de carbone forestier permettrait de comprendre si la récolte peut éviter les émissions de carbone dues aux feux et autres causes de mortalité des arbres. Enfin, l'impact sur la qualité des écosystèmes devrait être plus abordé par le sujet de la construction en bois.

Mots clés : Analyse du cycle de vie conséquentielle dynamique, bâtiments non résidentiels, structure en bois, stock de carbone, substitution de matériaux.

SUMMARY

The manufacture of wood products can have a lower impact on climate change than other building materials, and their carbon content can make buildings a temporary carbon sink. Technological advances, training, and synergy between industry and institutional players are also contributing to the acceptance of wood in buildings. With the increasing number of publications showing that the use of wood in construction can be an environmentally friendly option, decision-makers may be moving towards large-scale use. However, the large-scale use of wood products in buildings requires a better understanding of its consequences to support climate change (CC) policies. Therefore, a framework for assessing the increasing use of wood in construction is developed in this thesis. It is based on a prospective material flow analysis (MFA) modelling to support the life cycle assessment (LCA). The non-residential (NR) wood construction sector in Quebec is a good example as the provincial and federal governments seek to expand it. In 2008, the forestry industry suffered a crisis due to a decline in exports. Then, following successive strategies, the government of Quebec proposed the first version of the Wood Charter in 2013. It represents its commitment to increase the use of wood in construction to support the forestry and construction industry, as well as to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. As single-family residential buildings are predominantly made of wood, the commitment is aimed at non-residential and multi-family construction.

LCAs on wood have shortcomings that do not allow them to represent and analyze the consequences of its increasing use on a regional scale for a building stock. Firstly, the literature suggests that substitution of conventional building materials with wood products is desirable to mitigate GHG emissions. It presents the difference in CC impact that is attributable to the comparison of two buildings, structures, or products. Other environmental impacts are less discussed. The result of an assessment at the scale of a specific structure or building is hardly applicable to other study cases or extrapolable to the scale of a region for a heterogeneous building stock. Furthermore, these assessments do not allow for the impact of the processes involved or avoided as a result of this substitution to be considered. The identification of these processes is a challenge in consequential LCA (C-LCA). Finally, large-scale use of wood implies understanding the level of harvesting versus availability of the resource, but the quantification of material flows in the building sector is limited to residential buildings due to a lack of data for NR buildings.

In order to improve the assessment of the environmental impacts caused by an increase in the use of wood in construction, the response to the gaps is organized as follows. Firstly, parameters had to be developed to estimate and project the use of wood in NR structures. This estimate serves as a reference flow. It is integrated into an MFA to understand the importance of its extreme values in relation to the total wood harvest and the limit of the available resource. Material substitution factors have been created from different structures in the literature. They are applied to the amount of wood products used. Finally, dynamic modelling of tree growth and stock turnover allows for temporal consistency between the inventory of elementary flows and the dynamic characterization of the impact.

This research project makes several contributions. It allows to estimate the increasing use of wood in NR construction on a regional scale. This type of estimation is useful for the inventory of reference flows in an LCA and for completing an MFA. When integrated into an MFA, it supports the identification of constrained resources in the case of a C-LCA. This project also

proposes functional substitution factors for structural wood compared to a combination of steel and concrete. They are applicable for C-LCA and their variability allows to consider different structures and a displaced impact range for all environmental indicators in order to facilitate the interpretation of a large scale extrapolation. Finally, the project highlights the relative importance between substitution, end-of-life strategies, and temporary carbon sequestration. For a cohort of buildings, carbon storage in the cohort is temporal during its lifetime. However, at the scale of successive cohorts, carbon storage is more lasting, i.e. over the lifetime of the stock. Cumulative radiative forcing was not studied at this scale in the case of post-harvest regrowth.

In Canada, forest management is based on the annual allowable cut which is determined by provincial governments to ensure that harvest rates remain at sustainable levels. This allowable cut reflects the cubic meter of wood available for harvesting. The MFA showed the importance of the maximum estimation of the harvested volume for new structures regarding the allowable cut and changes in harvesting for exports and total harvesting. More empirical research is needed on the analysis of wood flows from other markets. Substitution modelling allowed to assess not only the displacement of CC impacts, but also human health, ecosystem quality and resources. Strategies and policies that respond to the climate emergency should also pay attention to ecosystem quality. In the minimum substitution scenario, wood avoids little steel and concrete. In addition, the unit production of the steel and concrete grades used causes fewer impacts than the that of the grades used in the average and maximum substitution scenarios. In this minimum scenario, it is carbon sequestration that enables CC impact avoidance. At the scale of the structure, the maintenance of this avoidance over time depends on the end of life of the structure. At the scale of the structure stock, the maintenance of the avoidance depends on its renewal and the end of life of the structures. Finally, using a static characterization factor for CC with a dynamic consequential inventory can lead to opposite conclusions to a dynamic factor.

Finally, various avenues for improvement are presented. Indeed, limitations remain in LCA and MFA modelling in terms of data completeness and quality, as well as in the complexity of dynamic impact and inventory methods. For example, the presented method for estimating the amount of wood could be compared to other methods, if data are available. A greater disaggregation between the different wood products and their sectors is necessary to better target the potential consequences of their complementarities, competitions and market dynamics. More comprehensive modeling of forest carbon cycles would help understand whether harvesting can avoid carbon emissions from fires and other causes of tree mortality. Finally, the impact on the quality of ecosystems should be addressed more by the subject of wood construction.

Keywords: Dynamic consequential life cycle assessment, non-residential buildings, wooden structure, carbon stock, material substitution.

REMERCIEMENTS

Je suis reconnaissant envers les Professeurs Ben Amor et Pierre Blanchet pour la confiance qu'ils m'ont accordée dans la réalisation du projet doctorat. Tous deux m'ont donné la liberté académique d'explorer tout ce que je pensais être intéressant et ont toujours été accueillants pour discuter de la voie à suivre. Ben et Pierre ont également fourni le financement du doctorat et, avec la bourse du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ont rendu cette recherche possible.

Je remercie également M François Robichaud de m'avoir encouragé et aidé dans la compréhension du secteur de la construction en bois au Québec. Il a apporté des données et une critique constructive sur la modélisation des flux du bois dans la construction.

Je tiens également à remercier mes collègues du laboratoire LIRIDE pour leur soutien. C'est toujours enrichissant de travailler à vos côtés. Merci pour le partage de connaissance dont vous faites preuve. Merci pour votre soutien et les activités partagées au sein et à l'extérieur de l'université. Merci à Ana, Audrey, Bastien, Davoud, Hessam, Joris, Léontine, Manisha, Edgar, Sogand, et Marcella pour vos conseils et votre temps libre. Je suis aussi particulièrement reconnaissant envers Marianne, Jean-Martin, Rizal, Kikki, et Xavier qui ont, dans le même temps, traversé les mêmes difficultés et émotions.

Un grand merci à Charles, Alexandre, Pierre, Jenny et Guylaine, ainsi qu'aux étudiants et au personnel encadrant du CIRCERB pour leur accueil et le partage de connaissance sur le bois.

Enfin, je tiens à remercier mes parents, mes frères et sœurs, et le reste de la famille pour leur soutien, leur éducation, leur bonne humeur, et leur amour. Merci d'avoir accepté ma longue absence. Sans eux, rien de tout cela ne serait possible.

Ce projet a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada par le biais de ses programmes IRC et CRD (IRCPJ 461745-18 et RDCPJ 524504-18), ainsi que les partenaires industriels de la chaire industrielle du CRSNG sur la construction en bois écoresponsable (CIRCERB).

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	1
1.2 PLAN DU DOCUMENT	3
CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART ET QUESTION DE RECHERCHE.....	6
2.1 ANALYSE DU CYCLE DE VIE	6
2.1.1 ACV attributionnelle	8
2.1.2 ACV conséquentielle.....	10
2.1.3 ACV dynamique et séquestration du carbone	13
2.2 ANALYSE DES FLUX DE MATIERES	16
2.3 SYNTHESE DES LACUNES	21
2.4 QUESTION DE RECHERCHE ET OBJECTIF	23
CHAPITRE 3 : APPROCHE QUANTITATIVE DU POTENTIEL D'UTILISATION DU BOIS DANS LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES	27
3.1 INTRODUCTION	30
3.2 RESEARCH BACKGROUND AND OBJECTIVE.....	31
3.2.1 Building material consumption	31
3.2.2 Drivers identification and projection.....	32
3.2.3 Upstream of the building sector	33
3.2.4 Objective	33
3.3 METHODOLOGY	34
3.3.1 System definition.....	34
3.3.2 Building wood consumption	35
3.3.3 Drivers identification and projection.....	36
3.3.4 Upstream of the building sector	37
3.3.5 Sensitivity analyses	38
3.4 RESULTS AND DISCUSSION	41
3.4.1 Building wood consumption	41
3.4.2 Upstream of the building sector	46
3.4.3 Discussion	47
3.5 CONCLUSIONS.....	48
CHAPITRE 4 : CONSEQUENCES ENVIRONNEMENTALES DE L'AUGEMENTATION DE LA PRODUCTION DU BOIS POUR LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES	49
4.1 INTRODUCTION	53
4.2 METHODOLOGY	55
4.2.1 Goal and scope	56
4.2.2 Material substitution estimation	56
4.2.3 Environmental impact modeling	59
4.2.4 Sensitivity analysis	61
4.3 RESULTS AND DISCUSSION	62
4.3.1 Material substitution effects	62
4.3.2 Climate change consequences	63

4.3.3	Environmental impact consequences.....	64
4.3.4	Sensitivity analysis	66
4.4	CONCLUSION.....	69
CHAPITRE 5 : ACV DYNAMIQUE D'UNE UTILISATION ACCRUE DU BOIS DANS LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES ET DE SES CONSEQUENCES : INTEGRATION DE LA SEQUESTRATION DU CARBONE ET DE LA SUBSTITUTION		71
5.1	INTRODUCTION	75
5.2	METHODOLOGY	77
5.2.1	Reference flows	78
5.2.2	Elementary flows	80
5.2.3	Static and dynamic characterization	82
5.2.4	Summary of the scenarios and the system boundary.....	83
5.3	RESULTS AND DISCUSSION	84
5.3.1	Reference substitution scenario	84
5.3.2	Conservative substitution scenario	86
5.3.3	Comparison of the scenarios.....	87
5.3.4	Absolute and relative metrics	88
5.3.5	Static and dynamic characterization	90
5.4	CONCLUSION.....	92
CHAPITRE 6 : DISCUSSION ET LIMITES.....		94
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS, CONTRIBUTIONS, ET TRAVAUX FUTURS		102
7.1	RESUME	102
7.2	CONTRIBUTIONS	104
7.3	TRAVAUX FUTURS.....	106
REFERENCES		108
ANNEXE A : DOCUMENTS SUPPLEMENTAIRES – CHAPITRE 3		127
A.1	THE BUILDING PERMITS.....	127
A.2	ANALYSIS OF THE AVERAGE ESTIMATION	129
A.3	SENSITIVITY ANALYSIS OF THE PROJECTIONS	134
A.3.1	Projections of the wood building share and the building permits	134
A.3.2	Projection of the sawmill processing yield.....	135
ANNEXE B : DOCUMENTS SUPPLEMENTAIRES – CHAPITRE 4.....		137
B.1	METHODOLOGY	137
B.1.1	Material substitution estimation	137
B.1.2	Environmental impacts modeling.....	143
B.2	RESULTS AND DISCUSSION	153
B.2.1	Impact displacement	153
B.2.2	Targets of the emissions in Québec	153
B.2.3	Larger contributors to wood product manufacturing.....	154
B.2.4	Sensitivity analysis	155
ANNEXE C : DOCUMENTS SUPPLEMENTAIRES – CHAPITRE 5		161

C.1	METHODOLOGY	161
C.1.1	Reference flows	161
C.2	RESULTS AND DISCUSSION	166
C.1.2	Reference substitution scenario	166
C.1.3	Conservative substitution scenario	167
C.1.4	Comparison of the scenarios	168
C.3	STATIC AND DYNAMIC CHARACTERIZATION	172
ANNEXE D : DOCUMENTS SUPPLEMENTAIRES – CHAPITRE 5		173

LISTE DES FIGURES

Figure 2. 1 : Relations entre les différentes étapes du processus d'ACV	6
Figure 2. 2 : Cycle de vie d'un système de produits.....	7
Figure 2. 3 : Procédure d'identification des technologies affectées par un changement dans la demande d'un produit.....	11
Figure 2. 4 : Réalisation du cadre de modélisation de l'utilisation croissante du bois dans les bâtiments en ACV-C	24
Figure 3. 1 : Overview of the suggested methodology	34
Figure 3. 2 : Building permits of the new buildings and the structural additions to existing buildings	39
Figure 3. 3 : Distribution of the <i>SCs</i>	40
Figure 3. 4 : Range of the example of the cost of a wood structure (<i>WSp</i>)	40
Figure 3. 5 : Share of the wood structures for new buildings (<i>WBs</i>).....	41
Figure 3. 6 : Estimation of wood products (m^3) in new NR structures of buildings in Quebec	42
Figure 3. 7 : Sensitivity of one numerator (<i>BP</i> , <i>SCs</i> , or <i>WBs</i>) and the denominator (<i>WSp</i>) ...	43
Figure 3. 8 : Extreme scenario of wood (m^3) in the structure of new NR buildings in Quebec	45
Figure 3. 9 : Total domestic softwood harvesting for NR building related to the availability and others projected end-uses.....	46
Figure 4. 1 : Graphical view of the calculation steps	56
Figure 4. 2 : Potential masses (tonne) of steel and concrete avoided with the use of wood in new NR structures	62
Figure 4. 3 : Climate change displacement in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood.....	63
Figure 4. 4 : Environmental impact displacement in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood.....	65
Figure 4. 5 : Potential range of impact displacements in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood.....	67
Figure 5. 1 : Schematic representation of the methodology used in the present study	78

Figure 5. 2 : System boundaries of each scenario	84
Figure 5. 3 : Cogeneration with end-of-life structures – Scenario ref-1	85
Figure 5. 4 : Cogeneration with end-of-life structures – Scenario cons-1	86
Figure 5. 5 : Comparison of the conservative and reference substitution scenarios	87
Figure 5. 6 : Scenario cons-1 - Instantaneous (top panel), cumulative (middle panel), and relative cumulative (bottom panel) radiative forcing	89
Figure 5. 7 : Dynamic climate change assessment in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood	90

LISTE DES FIGURES ANNEXES

Figure A. 1 : Correlation (1997 to 2017) between the total building permits [108] and the Investments [107].....	127
Figure A. 2 : Correlation (1991 to 2017) between the total building permits [108] and the population [117]	127
Figure A. 3 : Sensitivity of the building permits (BP) projections.....	134
Figure A. 4 : Sensitivity of the share of building with wood structures (WBs) projections ...	135
Figure A. 5 : Difference between the trends of sawmill yield since 1990 and 2008	135
Figure A. 6 : Sensitivity of the roundwood to harvest for the new NR structures	136

Figure B. 1 : Method for estimating the material substitution factors	140
Figure B. 2 : Literature-based material substitution factors of NR buildings	140
Figure B. 3 : Distribution of material substitution factors developed from the literature for NR buildings	141
Figure B. 4 : Relative impacts of the production of Sawlog and veneer log (softwood)	144
Figure B. 5 : Relative impacts of the production of wood products in Quebec (Qc) or Ontario (On)	146
Figure B. 6 : Relative impacts of the supply of wood products to the construction site from Quebec (Qc) or Ontario (On)	148
Figure B. 7 : Relative impacts of the supply of the structural steels in the world.....	149
Figure B. 8 : Relative impacts of the supply of the concrete grades in Quebec.....	150

Figure B. 9 : Range of substitution factors of the sample	157
Figure B. 10 : Sensitivity for only one material substitution with its minimum dataset	158
Figure C. 1 : Electricity generation (GWh) in Quebec (CA).....	163
Figure C. 2 : Electricity generation (GWh) in Ontario (CA).....	163
Figure C. 3 : Electricity capacity (MW) in Quebec (CA)	163
Figure C. 4 : Primary energy demand (petajoules) in Quebec (CA)	164
Figure C. 5 : Cogeneration with EOL structures - Scenario ref-1	166
Figure C. 6 : Cogeneration with EOL structures instead of Cogeneration with natural gaz - Scenario ref-2	166
Figure C. 7 : Particle boards made from EOL structures - Scenario ref-3	166
Figure C. 8 : Cogeneration with EOL structures - Scenario cons-1	167
Figure C. 9 : Cogeneration with EOL structures instead of cogeneration with natural gaz - Scenario cons-2.....	167
Figure C. 10 : Particle boards made from EOL structures - Scenario cons-3	168
Figure C. 11 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures – Scenario ref'-1	169
Figure C. 12 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures instead of cogeneration with natural gaz - Scenario ref'-2	169
Figure C. 13 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of particle boards made from end-of-life structures - Scenario ref'-3.....	169
Figure C. 14 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures - Scenario cons'-1	170
Figure C. 15 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures instead of cogeneration with natural gaz - Scenario cons'-2	170
Figure C. 16 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of particle boards made from end-of-life structures - Scenario cons'-3	170
Figure C. 17 : Comparison of the conservative and reference substitution scenarios with (a) decreasing and (b) constant GHG intensity of steel ingot and cement production	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 0. 1 : Liste des communications scientifiques	xvi
Tableau 0. 2 : Liste des communications scientifiques	xvii
Tableau 2. 1 : Résumé des méthodes de quantification des matériaux dans un ensemble de bâtiment.....	19
Tableau 2. 2 : Description des étapes du projet de recherche et correspondances avec les chapitres et objectifs.....	25
Tableau 2. 3 : Description des étapes du projet de recherche et correspondances avec les chapitres et objectifs - suite.....	26
Table 3. 1 : Effect of parameters on the result	43
Table 3. 2 : Effect of extreme values on the result in 2017.....	44
Table 3. 3 : Effect of extreme values on the result in 2050.....	44
Table 4. 1 : Material substitution factors in NR buildings	58
Table 4. 2 : Range of substitution factors.....	59
Table 4. 3 : Minimum transport distance (km) of saw logs which implies impact	69
Table 5. 1 : Name of the scenarios	84
Table 5. 2 : Comparison of the dynamic relative indicator (tonne CO ₂ eq. of Figure 5. 7) with the static approach.....	90
Table 5. 3 : Comparison of the dynamic relative indicator (tonne CO ₂ eq. of Figure 5. 4) with the static approach.....	91

LISTE DES TABLEAUX ANNEXES

Table A. 1 : Effect of average value of parameters – From the value of building permits to the value of new NR building constructions	129
---	-----

Table A. 2 : Effect of average value of parameters – From the value of new NR building constructions to the value of new NR structures	130
Table A. 3 : Effect of average value of parameters – From the value of new NR structures to the volume of wood in all new NR structures	131
Table A. 4 : Effect of average value of parameters – From the volume of wood in all new NR structures to the volume of wood for a share of NR buildings.....	132
Table A. 5 : Effect of average value of parameters – From the volume of wood for a share of NR buildings to the harvesting	133
Table A. 6 : Effect of projection of the BP.....	134
Table A. 7 : Effect of projection of the WBs.....	135
Table B. 1 : References of the bill of materials	137
Table B. 2 : Characteristics of the case studies	138
Table B. 3 : Material substitution factors in NR buildings.....	139
Table B. 4 : sfi with and without the uncertain quantities	142
Table B. 5 : Relative changes of the sfi between the inclusion and the exclusion of the uncertain quantities.....	142
Table B. 6 : Density of wood and concrete products.....	142
Table B. 7 : Impacts of landfarming 1 kg of wood ash mixture	144
Table B. 8 : Impacts of 1 MJ heat production, district or industrial.....	145
Table B. 9 : List of Canadian cross laminated plant.....	147
Table B. 10 : Steel product compositions.....	149
Table B. 11 : Impacts of the supply 1 kg of steel product to the construction site from an average location in the world or Canada. Sensitivity from Global to Canada (%).....	150
Table B. 12 : Concrete grade designations	151
Table B. 13 : Transportation distances in the wood supply chain	152
Table B. 14 : Transportation distances in the steel supply chain	152
Table B. 15 : Transportation distances in the concrete supply chain	153
Table B. 16 : Environmental displacement ratio	153
Table B. 17 : Targets of the emissions in Québec in 2017, 2030, and 2050	153
Table B. 18 : Proportion of the avoidances regarding the reduction targets	154

Table B. 19 : The largest contributors to the 3 manufacturing stages of wood products according to the four impacts	154
Table B. 20 : Sensitivity analysis on sf_i and material impacts datasets	156
Table B. 21 : Impact displacements in the construction supply chain by substituting steel and concrete with the wood coming from Quebec only or Quebec and Ontario	159
Table B. 22 : Sensitivity analyses on transport distances (+/-100%) in the wood supply chain	159
Table B. 23 : Total impact displacements in the construction supply chain by substituting steel (global to Canadian average) and concrete with wood	160
Table C. 1 : Evolution of wood consumption ('000 m ³) in the cogeneration and energy products industries (Quebec).....	162
Table C. 2 : Evolution of wood consumption ('000 m ³) in the veneer, plywood and panel industries (Quebec).....	165
Table C. 3 : Roundwood consumption ('000 m ³) in the veneer, plywood and panel industries (Quebec)	165
Tableau D. 1 : CLT - analyse de contribution des GES	174
Tableau D. 2 : Acier déplacé scénario de référence - analyse de contribution des GES.....	175
Tableau D. 3 : Acier déplacé scénario conservateur - analyse de contribution des GES.....	176
Tableau D. 4 : Béton déplacé scénario de référence - analyse de contribution des GES.....	177
Tableau D. 5 : Béton déplacé scénario conservateur - analyse de contribution des GES	178
Tableau D. 6 : Fin de vie 1 : Chaleur & électricité (production d'éoliennes évitées par l'électricité générée) - analyse de contribution des GES	179
Tableau D. 7 : Fin de vie 2 : Chaleur & électricité (Gaz naturel évité par chaleur & électricité générés) - analyse de contribution des GES	180
Tableau D. 8 : Fin de vie 3 : Panneaux particules (Pas d'évitement) - analyse de contribution des GES	181

ACRONYMES FRANÇAIS

ACV :	Analyse du Cycle de Vie
ACV-A :	ACV-Attributionnelle
ACV-C :	ACV-Conséquentielle
AFM :	Analyse des Flux de Matières
CC :	Changement climatique
GES :	Gaz à Effet de Serre
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICM :	Indicateur de composition des matériaux
ICV :	Inventaire du Cycle de Vie
ICV-C :	ICV-Conséquentiel
NR :	Non résidentiel
pmp :	Pied Mesure de Planche
PIB :	Produit Intérieur Brut

ACRONYMES ANGLAIS

A-LCA :	Attributionnal life cycle assessment
CC :	Climate change
CHP :	Combined heat and power
C-LCA :	Consequential life cycle assessment
C-LCI :	Consequential life cycle inventory
GDP :	Gross domestic product
GHG :	Greenhouse gas
IPCC :	Intergovernmental panel on climate change
LCA :	Life cycle assessment
LCI :	Life cycle inventory
mbf :	Thousands of board feet
MCI :	Materials composition indicator
MFA :	Material flow analysis
NR :	Non-residential
PB :	Particleboard

LISTE DES COMMUNICATIONS SCIENTIFIQUES

Les recherches menées dans le cadre de la thèse ont donné lieu aux publications et aux présentations orales ci-dessous (Tableau 0. 1 et Tableau 0. 2).

Tableau 0. 1 : Liste des communications scientifiques

Diffusion	Référence
Article de conférence	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Enhancing consistency in consequential life cycle inventory through material flow analysis. Sustainable Built Environment conference "Transition Towards a Net Zero Carbon Built Environment" , September. 11-14 th 2019, Graz, Austria. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 323 012056. DOI: 10.1088/1755-1315/323/1/012056
Article de revue scientifique	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2020. Exploring the regional-scale potential of the use of wood products in non-residential buildings: A building permits-based quantitative approach. BioResources . 15(1), 787-813. DOI: 10.15376/biores.15.1.787-813
Article de revue scientifique	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2021. Regional environmental life cycle consequences of material substitutions: The case of increasing wood structures for non-residential buildings. Journal of Cleaner Production . Volume 328, 15 December 2021, 129671. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129671
Article de revue scientifique	Cordier S, Blanchet P, Robichaud F, Amor B. 2022. Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO2 sequestration and material substitutions. Building and Environment . Volume 226, December 2022, 109695. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109695
Affiche scientifique	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2017. Analyse du Cycle de Vie Conséquentielle de l'augmentation de la pénétration du bois dans le secteur de la construction. Ecole d'été CIRCERB . 15 Juin 2017, Québec, Ca.
Affiche scientifique	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Schématiser l'économie d'un marché émergent: Étude de cas sur les produits de bois d'ingénierie en construction non résidentielle. Rendez-vous de l'économie circulaire . 9-10 Mai 2019, Sherbrooke, Ca.
Affiche scientifique	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2020. Scaling approach to assess the potential of the use of wood in an emerging market through material flow analysis. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC Europe 30th Annual Meeting online . May 3-7 th 2020, Dublin, Ireland, On line.

Tableau 0. 2 : Liste des communications scientifiques

Diffusion	Référence
Affiche scientifique et flash talk	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Analyse environnementale du cycle de vie des conséquences de l'augmentation de la pénétration du bois dans le secteur de la construction. Carrefour Forêts 2019 (organisé par le Ministère des Forêts, de la Faune et Parcs). 2-4 Avril 2019, Centre des congrès de Québec, Québec, Ca.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Consequential LCA of the growing use of wood in non-residential construction in Quebec: Mapping the circularity for the inventory flows. LIRIDE/NRCan Workshop . July 24 th 2019, Ottawa, Ca.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Enhancing consistency in consequential life cycle inventory through material flow analysis. Sustainable Built Environment conference "Transition Towards a Net Zero Carbon Built Environment" . September 11-14 th 2019, Graz, Austria.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2019. Schématiser un marché émergent: Étude de cas sur l'utilisation croissante du bois en construction non résidentielle. Concours Thèses des bois Xylofutur . Septembre 30 th 2019, Québec, Ca.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2021. ACV conséquentielle de l'augmentation de la pénétration du bois dans le secteur de la construction. Matériaux Renouvelables Québec (MRQ) 20 minutes de science . 23 Avril 2021, En ligne https://www.youtube.com/watch?v=OpVyTsgvQ70
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2021. Identifier les flux du bois impliqués par l'augmentation de son utilisation en construction non résidentielle au Québec. ACFAS Colloque 606 : La gouvernance des forêts à l'ère des changements climatiques. 7 Mai 2021, En ligne.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2021. ACV conséquentielle de l'augmentation du bois en construction. Le groupe étudiant " Bâtisseurs écologiques de l'Avenir " Université de Sherbrooke. 7 Juillet 2021, Sherbrooke, Québec, Ca.
Présentation orale	Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2022. Regional environmental life cycle consequences of material substitutions : The case of increasing wood structures for non-residential buildings. ACLCA 2022 . 9 Novembre 2022, On line.
Présentation orale	Cordier S, Blanchet P, Robichaud F, Amor B. 2022. Dynamic LCA of an increased use of wood in buildings and its consequences : Integration of CO ₂ sequestration and material substitutions. ACLCA 2022 . 10 Novembre 2022, On line.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Les avancées technologiques, la formation, et la synergie qui se mettent en place entre les acteurs industriels et institutionnels participent à l'acceptation du bois dans les bâtiments. Les exemples récents de bâtiments en bois de moyenne et grande hauteur jouent aussi un rôle dans cette acceptation. Ces premiers exemples peuvent représenter une faisabilité technique à l'échelle du bâtiment. Avec le nombre croissant de publications montrant que l'utilisation du bois dans la construction peut aussi être une option écologique, les décideurs pourraient s'orienter vers une utilisation à plus grande échelle. Cependant, on peut se poser la question de l'effet environnemental à grande échelle pour un stock croissant de bâtiment au cours du temps. Cette utilisation peut provoquer des changements dans les secteurs d'activité et des conséquences environnementales suivront. Il est donc question d'explorer les changements potentiels et leurs impacts environnementaux.

Le secteur de la construction non résidentielle (NR) en bois au Québec est un bon exemple car le gouvernement cherche à l'accroître. En 2008, l'industrie forestière a vécu une crise très importante dans son histoire avec une baisse des volumes de production du bois d'œuvre québécois et des exportations. Cela fait suite à la crise financière de 2007-2008 et à la récession. La baisse des constructions résidentielles aux Etats-Unis (depuis le début de 2006) et dans l'est du Canada, après une croissance soutenue, ont également contribué à cette diminution de la production [1]. A l'opposé, la construction NR présentait des perspectives d'évolution. En 2008, le ministère des Ressources naturelles et de la Faune met en œuvre la stratégie d'utilisation du bois dans la construction [2]. Cela conduit à la mise en place de la charte du bois [3] qui a connu plusieurs versions de 2013 à 2017, avant d'aboutir, en 2021, à une politique d'intégration du bois dans la construction [4]. Elle présente le bois comme un outil de lutte contre les changements climatiques et repose sur 4 axes : l'exemplarité gouvernementale, la construction innovante, la formation, et la recherche et l'innovation. Elle comporte des actions concrètes pour soutenir l'industrie de la construction en bois. Pour cela, elle vise la construction NR (commerciale, industrielle, institutionnelle) et multifamiliale de moyenne (de cinq ou six étages) et de grande hauteur (de sept étages et plus). En effet, ces bâtiments présentent un grand potentiel

d'utilisation du bois. L'attribution d'aide financière pour la recherche et le développement ainsi que l'élaboration de programme de formation montrent une volonté d'accroître l'utilisation du bois.

L'analyse du cycle de vie (ACV), normalisée par les normes ISO (principes, cadres, exigences et lignes directives : ISO 14040/44 - 2006) [5], [6], est une méthode d'évaluation des impacts environnementaux concernant l'épuisement des ressources, la santé humaine, la qualité des écosystèmes, et le changement climatique (CC). Elle considère une grande variété d'échange entre le système étudié et l'environnement. Ces échanges sont les intrants et émissions/rejets du système, et le système comprend le cycle de vie du procédé, produit ou service étudié. Les frontières du système délimitent les processus élémentaires inclus dans l'étude ACV [6]. L'évaluation est réalisable à une échelle spatio-temporelle globale pour les étapes du cycle de vie du système (extraction de matière, production, utilisation, et fin de vie du système). En plus d'évaluer les impacts attribuables à la fonction que remplit le système (ACV-attributionnelle), l'ACV peut être réalisée selon l'approche conséquentielle (ACV-conséquentielle). Cette deuxième approche permet d'évaluer les conséquences d'un changement de la demande ou de l'offre en incluant uniquement les processus qui sont affectés par ce changement grâce à une modélisation qui considère les informations sur le marché dans les données de l'inventaire du cycle de vie (ICV) [7]. Cela implique une différence dans l'identification des processus et des chaînes de causes à effets à inclure [8]. Les frontières du système peuvent donc être élargies au-delà des processus directement impliqués dans le cycle de vie du système. Cependant, l'ACV a besoin d'adaptation et de combinaisons méthodologiques pour identifier et modéliser les changements car elle peut reposer sur des approches statiques [9]. Les fournisseurs concernés, la délimitation et les tendances du marché, ainsi que la substitution font partie des éléments partiellement considérés [10]. Divers mécanismes peuvent jouer un rôle dans le fait qu'un fournisseur soit concerné ou non. Lorsqu'un fournisseur est soumis à des contraintes, il ne peut pas livrer un produit supplémentaire, que ce soit en raison de réglementations restrictives ou lorsque la capacité de production maximale est atteinte [11].

L'analyse des flux de matières (AFM) dynamique peut alors être une aide pour donner la tendance des volumes du marché et les contraintes physiques sur les ressources ou les rendements technologiques. Elle peut aussi être avantageuse pour l'aide à la décision à grande ou petite échelle en raison de sa cohérence de modélisation des flux de matière. Elle consiste à

analyser les flux et stocks de matières d'un système défini dans l'espace et le temps. C'est une analyse qui fait systématiquement le lien entre les sources, les flux, et les puits intermédiaires et finaux d'une matière en respectant la loi de la conservation de la masse. Par conséquent, elle serait adaptée à l'utilisation du bois, une ressource renouvelable qui fonctionne comme un puits de carbone variable dans l'environnement bâti. Par une simple comparaison des quantités, la méthode permet une aide à la décision dans la gestion des ressources, des déchets, et autres échanges entre un système et l'environnement. L'AFM est utilisée pour quantifier les flux physiques de procédés, systèmes, ou secteurs d'activité. Cette analyse est également vue comme un prérequis pour la mise en œuvre de l'ACV [12], ou pour évaluer un impact spécifique correspondant aux flux [13]. Cet outil est idéal dans le contexte de l'écologie industrielle et de l'évaluation des stocks et des flux de matières ou produits.

Ces modélisations présentent des limites concernant la quantification, l'identification, et la modélisation des flux de matériaux à une échelle macroscopique pour un stock de bâtiment. La substitution de matériaux est également concernée à cette échelle. Dans l'analyse du cycle de vie conséquentielle, l'aspect dynamique des flux et le carbone biogénique sont peu considérés. L'analyse des flux de matières dynamique rend possible la prise en compte du temps et de l'utilisation des ressources. L'analyse du cycle de vie environnementale intègre les conséquences environnementales des changements d'utilisation des ressources. La combinaison de ces modèles peut alors permettre d'élaborer l'inventaire des émissions selon des scénarios qui reflètent le secteur de la construction en bois.

1.2 Plan du document

Cette thèse est organisée de la façon suivante :

Chapitre 2 : État de l'art et question de recherche

Le second chapitre établit l'état des connaissances relatives à l'ACV, l'AFM, et la question de recherche. Il contient 4 sous-chapitres :

- Définir les caractéristiques de l'analyse du cycle de vie, établir la façon dont elle est appliquée à partir de cas d'études sur le bois et le non résidentiel.
- Définir les caractéristiques de l'analyse des flux de matière, établir la façon dont elle est appliquée à partir de cas d'études sur le bois et le non résidentiel.

- La synthèse des lacunes.
- La formulation de la question de recherche, de l'objectif général et ses objectifs spécifiques.

Chapitre 3 : Approche quantitative du potentiel d'utilisation du bois dans les structures non résidentielles

Le **troisième chapitre** expose la **méthode proposée pour modéliser l'utilisation croissante du bois dans les structures non résidentielles**. Il présente le cadre proposé pour réaliser l'inventaire dynamique du flux de référence d'une ACV-C portant sur l'utilisation du bois dans les bâtiments. L'approche est appliquée à un cas d'étude sur des structures de bâtiments non résidentiels du parc immobilier Québécois, à l'horizon 2050.

Les travaux introduits dans ce chapitre ont été publiés sous forme d'article dans la revue *BioResources*.

Chapitre 4 : Conséquences environnementales de l'augmentation de la production du bois pour les structures non résidentielles

Le **quatrième chapitre** présente la **méthode proposée pour modéliser des conséquences à l'utilisation croissante du bois et les résultats de son application** aux structures non résidentielles au Québec. Ce chapitre porte sur les fournisseurs et la substitution des matériaux. L'approche est appliquée à l'acier, au béton et au bois de construction.

Le cadre et l'analyse proposés dans ce chapitre ont été publiés sous forme d'article dans la revue *Journal of Cleaner Production*.

Chapitre 5 : ACV dynamique d'une utilisation accrue du bois dans les structures non résidentielles et de ses conséquences : Intégration de la séquestration du carbone et de la substitution

Le **cinquième chapitre** contient la **modélisation dynamique de l'inventaire conséquentiel et de l'impact sur le changement climatique** de l'utilisation accrue des structures en bois. Il associe la modélisation dynamique du roulement de stock avec la séquestration du carbone dans les structures en bois.

L'évaluation proposée dans ce chapitre a été publiée sous forme d'article dans la revue *Building and Environment*.

Chapitre 6 : Discussion et limites

Le **sixième chapitre** contient les discussions élargies du travail sur les méthodes de quantification des matériaux, la concurrence potentielle entre les marchés du bois, et la substitution des matériaux. Il propose également différentes pistes d'améliorations méthodologiques potentielles et de travaux futurs comme la modélisation de la gestion forestière sur le plan du climat et la qualité des écosystèmes.

Chapitre 7 : Conclusion, originalité, et travaux futurs

Le **dernier chapitre** contient les conclusions de la thèse. Elle rappelle l'étendue des travaux de recherche, les contributions, et les perspectives de recherche.

La bibliographie de la thèse suit le style numérique de la société IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART ET QUESTION DE RECHERCHE

2.1 Analyse du cycle de vie

L'ACV se réalise en 4 étapes qui peuvent se faire de façon itérative (Figure 2. 1). La définition des objectifs et du champ d'étude précise les objectifs de l'étude, l'unité fonctionnelle (quantification de la fonction du système étudié), et les frontières physiques, géographiques et temporelles du système. L'inventaire du cycle de vie (ICV) compile les données (énergie et autres flux élémentaires échangés entre le système et l'environnement, ainsi que les flux de produits échangés entre les processus du système). L'évaluation des impacts caractérise les flux élémentaires en impacts. L'interprétation identifie les causes des impacts et évalue l'influence des paramètres et la robustesse des résultats.

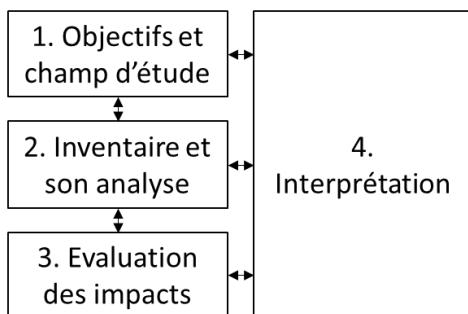


Figure 2. 1 : Relations entre les différentes étapes du processus d'ACV [5]

En ACV, le système étudié est modélisé par un ensemble de processus élémentaires remplissant une ou plusieurs fonctions définies et comportant les flux de produits et les flux élémentaires [5] (Figure 2. 2).

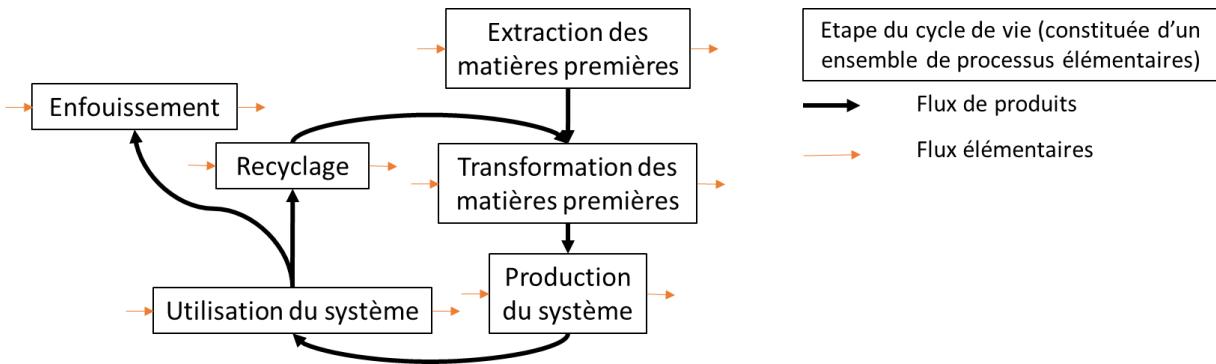


Figure 2. 2 : Cycle de vie d'un système de produits

La littérature distingue deux types d'ACV qui ont les mêmes principes, mais une approche différente. La terminologie de ces deux types d'ACV est employée depuis plusieurs années, mais commence à se définir de façon plus précise lors d'un atelier sur les données d'électricité de l'inventaire du cycle de vie (ICV) qui s'est tenu à Cincinnati (E.-U.) en 2001 [14]. Dans ces deux approches, la définition des frontières du système et le choix des processus à inclure sont les principales différences. Cela implique une différence dans l'identification des processus et des chaînes causales à inclure [8]. La première ACV est plus connue sous l'appellation d'ACV-Attributionnelle (ACV-A). Elle consiste à attribuer au système étudié, les impacts environnementaux causés par celui-ci tout au long de son cycle de vie. L'ICV modélise la circulation des flux de produits et des flux élémentaires à chaque étape du cycle de vie pour que le système fonctionne. Les impacts d'une co-production sont alloués selon des règles de répartition physiques ou économiques entre les produits dédiés au système étudié et les coproduits dédiés à un autre système. Les impacts du recyclage sont également attribués selon une répartition physique ou économique en rapport avec le taux de recyclage ou le contenu recyclé. Dans la seconde, ACV-Conséquentielle (ACV-C), l'inventaire des données du cycle de vie modélise le changement de la circulation des flux suite à une décision concernant le système [14]. Cette décision peut concerner l'augmentation, la diminution, ou l'interdiction de l'utilisation du système. En ACV-C, les activités de co-production et de recyclage sont entièrement incluses dans l'inventaire et traitées selon les autres activités qu'elles peuvent éviter ou provoquer. Quel que soit l'approche, l'ACV utilise un large panel d'indicateurs environnementaux, elle permet donc vérifier si un changement entraîne une réduction globale ou une augmentation d'un (ou des) impact(s) dans une (ou plusieurs) phase(s) du cycle de vie.

2.1.1 ACV attributionnelle

Des études ACV ont pu mettre en valeur l'emploi du bois dans les bâtiments notamment en termes d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre (GES). Ces bénéfices sont dus à une production du bois de construction moins émettrice de GES que d'autres matériaux [15]–[18]. Dans ce secteur, l'évitement des GES grâce au bois est de plus en plus étudié. La littérature présente une variété de recherches sur des facteurs agrégés de déplacement des GES, de CO₂, ou de carbone selon un archétype, système, ou sous-produit de construction [17], [19]–[22]. Ces facteurs sont le résultat d'ACV-A comparatives entre un ou plusieurs produits, systèmes, bâtiments majoritairement en bois et un ou plusieurs produits, systèmes, bâtiments majoritairement en un autre matériau. A l'échelle du bâtiment, la différence de CO_{2eq} entre le bâtiment non bois et le bâtiment bois par rapport au bâtiment non bois est entre 9 et 56 % [17]. Pour un mélange d'échelles (bâtiment, plancher, porte, toit, fenêtre, etc.), chaque tonne de carbone dans le bois substitute de -2.3 t à 15 t de carbone dans les éléments non-bois [19]. A l'échelle des produits du bois d'œuvre et du panneau, 0.54 t et 0.45 t de carbone sont déplacées par tonne de carbone contenu dans le bois [20]. Selon les étapes du cycle de vie considérées, les produits structuraux déplacent de -0.9 à 5.5 t de carbone, et les non structuraux de 0.2 à 4.7 t par tonne de carbone contenu dans le bois [21]. Les résultats suggèrent que la substitution est souhaitable pour atténuer les émissions de GES, cependant, les autres indicateurs d'impact sont moins abordés dans la littérature.

En plus de l'accent mis sur les GES, ces facteurs de déplacement varient grandement entre eux car ils contiennent les sources d'incertitudes et de variabilités typiques des ACV comme les limites du système, les scénarios de fin de vie, la dynamique forestière, la considération du carbone biogénique, etc. Parmi ces limites, la quantité de matériaux/produits substitués varie en fonction de l'architecture du bâtiment. Cette variabilité est importante à considérer car l'impact évité estimé dépend de la quantité de matériaux nécessaires pour remplir la fonction des structures. Ignorer cette variabilité ne permet pas de montrer la robustesse du résultat par rapport à un des principaux arguments de l'utilisation du bois, éviter l'utilisation d'autres matériaux. Ces facteurs de déplacement ne sont pas applicables à d'autres cas d'étude car ils sont le résultat d'une étude spécifique. Par conséquent, pour évaluer les déplacements de l'impact environnemental, il est nécessaire d'étudier les masses des matériaux déplacés (facteurs de

substitution de matière en unités de masse) et le résultat d'impact évité. Ces facteurs doivent représenter la performance structurelle des matériaux substitués du cas d'étude.

Outre les facteurs de déplacement, dans la littérature, il y a deux façons d'évaluer la performance du bois dans les bâtiments par rapport à d'autres matériaux. D'une part, les études comparent l'inventaire du bâtiment majoritairement construit en bois à l'inventaire d'un autre bâtiment [16], [18], [23], [24]. A l'échelle d'un bâtiment, Hoxha *et al.* (2014) ont analysé les trois paramètres suivants : durée de vie, quantités des matériaux et impact élémentaire des matériaux de construction. Ils ont montré que les incertitudes sur les quantités de matériaux n'influencent pas la variabilité du résultat [25]. Cependant, puisqu'à l'échelle d'une région, les architectures peuvent varier entre deux bâtiments d'une même fonction [26], [27] ou de fonctions différents [16], [23], la quantité des matériaux substitués peut elle aussi varier. Généraliser la substitution potentielle de matériaux d'un seul bâtiment à une plus grande échelle ne permettrait pas de couvrir un intervalle de possibilité. Pour les évaluations à plus grande échelle, les chercheurs ont utilisé un archétype de bâtiment ou un système structurel, et ils ont supposé un ratio pour la modélisation de la substitution des matériaux [28], [29]. Eriksson *et al.* (2012) ont souligné l'importance de la conception des bâtiments sur la demande en bois et donc sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre [30]. Jusqu'à présent, la littérature présente différentes méthodes et cas d'études pour évaluer la performance du bois par rapport à d'autres matériaux fonctionnellement équivalents en utilisant une approche attributionnelle ou sans spécifier que l'approche est conséquentielle. Cette approche ne reflète pas les conséquences d'un matériau qui prend des parts de marché sur d'autres matériaux. Par conséquent, un examen des déplacements d'impacts potentiels des structures en bois avec des facteurs de substitution qui représentent les quantités requises pour remplir la fonction structurelle (en considérant sa variabilité) à une échelle régionale semble nécessaire. De plus, la prise en compte des effets d'ordre de grandeur supérieure de la substitution progressive des matériaux, en dehors des limites du secteur du bâtiment, est moins abordée dans la littérature sur le bâtiment. Ces effets d'ordre supérieur peuvent mettre en évidence des changements nécessaires dans l'approvisionnement des ressources selon les contraintes des fournisseurs. En effet, il faut étudier la quantité totale de la ressource demandée à l'échelle régionale, nationale, ou mondiale par rapport à sa disponibilité. La prise en compte de cette disponibilité de l'offre est davantage

abordée dans l'approche conséquentielle. Cette approche cherche à prendre en compte la réponse du marché face à un changement dans la demande [9].

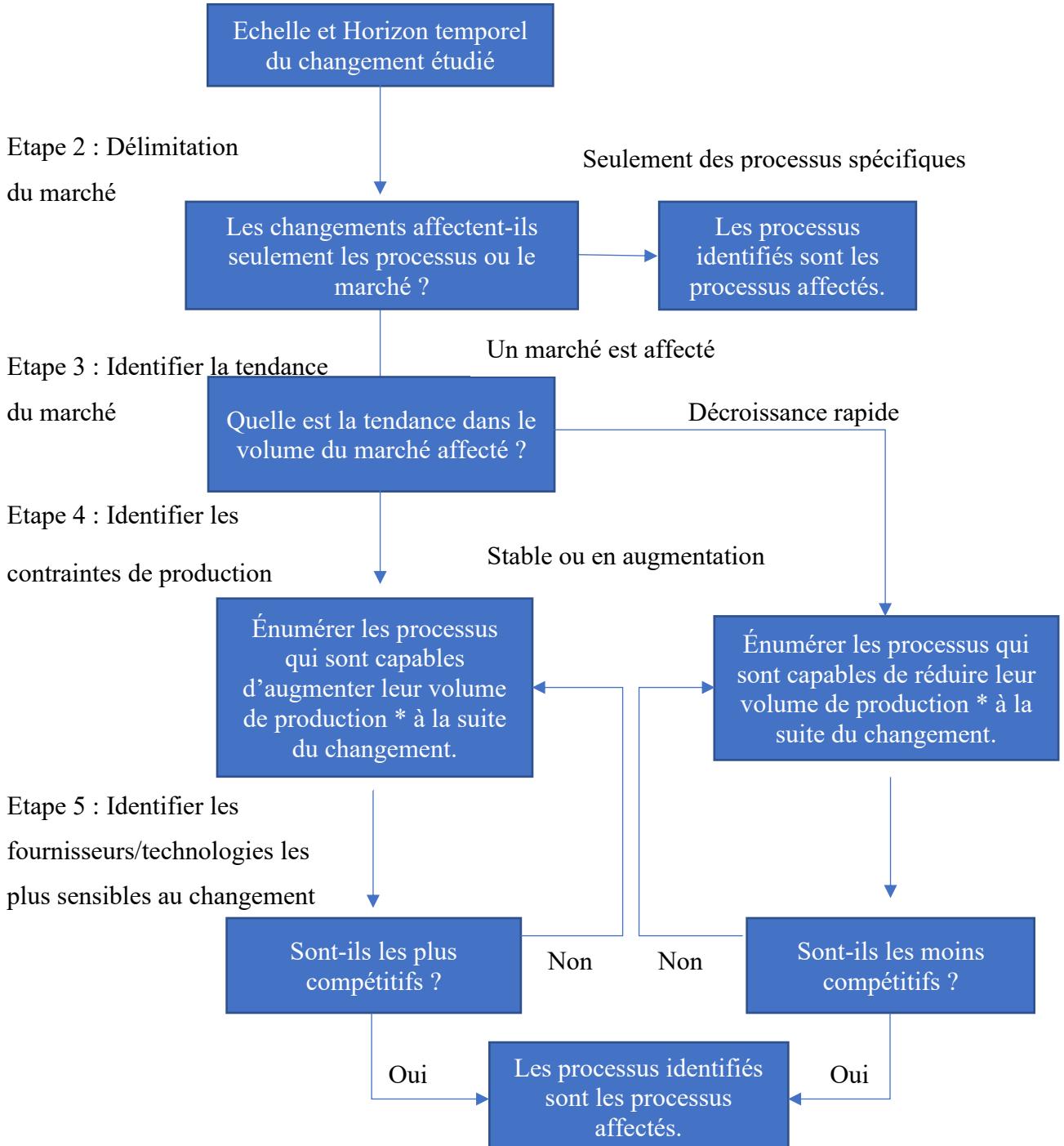
2.1.2 ACV conséquentielle

Pour modéliser le changement entre la situation avant et après une décision, il faut définir ces situations et identifier ce qui peut et ne peut pas changer. Pour cela, une approche procédurale est élaborée à partir de 1999 par Weidema *et al.* C'est une procédure d'identification générale des technologies affectées par des changements et celles qui ne le sont pas (contraintes) [7], [31]. Celle-ci se présente en étapes successives qui questionnent l'utilisateur sur les technologies qui peuvent être affectées et les conditions du marché dans lesquelles le changement se produit. Le diagramme suivant (Figure 2. 3) présente les étapes de la procédure.

Il faut analyser les relations de cause à effet entre la demande et l'offre. Dans un marché croissant, la demande supplémentaire est satisfaite par une capacité de production supplémentaire. Cette capacité de production supplémentaire provient de fournisseurs non contraints. Si la demande augmente (ou diminue) d'une unité, les fournisseurs augmenteront (ou en diminueront) leur production d'une unité, c'est l'hypothèse d'une élasticité parfaite de l'offre [7]. Celle-ci n'est plus valable si les fournisseurs sont contraints ou si les marchés sont imparfaits. Les contraintes sont de plusieurs types :

- Contrainte politique : Suite à une décision politique qui peut conduire à la restriction ou l'interdiction d'un produit.
- Contrainte de coproduction : les co-produits dépendants (non déterminants) sont contraints par la production du produit déterminant. En effet, une modification de la demande pour un co-produit issu d'un processus multifonctionnel ne peut pas entraîner une modification de sa production [32].
- Contrainte de recyclage : Si le produit recyclé est pleinement utilisé, une augmentation de sa demande ne peut pas être satisfaite, car il dépend de la filière de recyclage et de la disponibilité de la matière à recycler.
- Contrainte naturelle : La disponibilité de la ressource.
- Contrainte technologique : Les fournisseurs peuvent être en sous-capacité pour répondre à une augmentation de la demande à court terme.

Etape 1 : Identifier l'échelle et l'horizon temporel du changement étudié



* pour les changements à long terme, le volume se rapporte à la capacité de production, tandis que pour les changements à court terme, il se rapporte à la production dans la capacité existante.

Figure 2. 3 : Procédure d’identification des technologies affectées par un changement dans la demande d’un produit. Adaptée et traduite de Weidema (2003) [33]

L'application de cette procédure utilise généralement des bases de données statistiques [9]. L'ACV-C est souvent considérée comme l'approche la plus pertinente, du moins d'un point de vue conceptuel, cependant, il est vite apparu que malgré l'existence de nombreuses discussions théoriques sur l'ACV-C, le passage de la théorie à la pratique recevait beaucoup moins d'attention [34]. La disponibilité des données sur les différents niveaux technologiques et sur les fournisseurs marginaux est un défi en ACV-C. De plus, la possibilité de différents scénarios multiplie les flux affectés à identifier [35]. L'analyse des flux de matière peut aider remonter la chaîne de production pour identifier les flux et voir si une augmentation de la production est possible sans limiter la disponibilité de la ressource.

Des auteurs ont étudié les avantages environnementaux de l'augmentation du bois comme substitut aux matériaux non ligneux dans le secteur NR [36]. Cependant, la modélisation de la substitution [19] est une estimation de la différence des émissions entre la production des produits en bois et des autres matériaux. Cette estimation provient de 21 études d'ACV-attributionnelle avec des limites de système variables. Dans le secteur du bâtiment, d'autres ACV-conséquentielles qui considèrent la substitution existent [37]–[41]. Les substitutions modélisées en ACV-C sont principalement statiques et les unités fonctionnelles se réfèrent à un seul produit. Si on suppose qu'il existe une linéarité entre les conséquences d'une petite décision et la taille du changement, la taille précise de l'unité fonctionnelle est moins importante [7]. Toutefois, pour les décisions concernant l'ensemble du secteur, la taille doit refléter l'ampleur des conséquences [7]. Cela peut aussi être une question de disponibilité des données et de l'analyse des stocks et des flux de matériaux, mais négliger l'échelle n'aide pas à positionner la demande par rapport à la limite des ressources disponibles. Il n'y a pas d'études qui prennent également en compte les déplacements potentiels de l'impact des structures en bois en fonction des disponibilités et des approvisionnements en ressources (que ce soit pour le bois ou les matériaux alternatifs). Les améliorations qui pourraient être faites concernent l'investigation des fournisseurs marginaux pour les produits de construction et de combustion qui sont substitués par le bois. Eriksson *et al.* (2012) [30] et Nepal *et al.* (2016) [36] ont utilisé un modèle économique du secteur forestier (EFI-GTM [42], GFPM [43]) pour prendre en compte le marché de l'approvisionnement en bois. Mais le type d'acier déplacé ou nécessaire à la connexion des produits bois n'est pas précisé [30], [44] ou bien il s'agit d'acier recyclé [45]. Considérer que l'acier déplacé est de l'acier recyclé est discutable car c'est une ressource contrainte [46].

Dans les revues sur la séquestration du carbone, le stockage dans l'environnement bâti et la substitution, l'approche utilisée (attributionnelle ou conséquentielle) n'est pas toujours clairement définie [47], [48]. Dans une méta-analyse de 2021 sur les émissions de GES des bâtiments en bois, 17 % des études étaient conséquentielles ou dynamiques [49]. Des études récentes ont combiné la modélisation dynamique et inclus le stockage temporaire du carbone dans les produits du bois [50] ou les bâtiments [51], [52]. Cependant, il manque une perspective conséquentielle et dynamique sur la substitution des matériaux. Les études devraient considérer l'approche conséquentielle pour améliorer la compréhension du marché et des scénarios d'approvisionnement lors de l'augmentation de l'utilisation du bois dans les bâtiments [49]. L'approche conséquentielle peut également s'intéresser à modéliser les conséquences potentielles des produits usagés en bois après la démolition progressive du stock de bâtiments.

Hansen *et al.* (2022) [10] ont identifié trois applications différentes des recherches concernant l'ACV-C de l'utilisation du bois, à savoir les études empiriques qui examinent les conséquences d'une décision sur la base d'une étude de cas, les études qui examinent soit les aspects de la méthode, soit les aspects de la méthode et du cas empirique, soit les aspects du cas non-ACV-C, et les études sur le développement de méthode de modélisation de l'inventaire. Dans la 3^{ème} catégorie, Cordier *et al.* (2019) considèrent l'échelle d'un stock de bâtiments [53]. L'intérêt est d'avoir un inventaire pour plusieurs bâtiments dont les années de construction et de fin de vie sont différentes.

2.1.3 ACV dynamique et séquestration du carbone

Peu d'études considèrent une évolution temporelle des facteurs d'émissions de GES puisque l'avantage d'une substitution est supposé statique. Dans la mesure où le monde se décarbonise, l'avantage de la substitution peut diminuer [48], [54]. Certains auteurs ont discuté de la date d'expiration de la substitution par des produits en bois en simulant une décarbonation mondiale rapide conformément à l'engagement de l'Accord de Paris [55]. Pour cela, un coefficient dépendant du temps force progressivement la valeur des facteurs de substitution (résultats d'ACV-A discutés à la section 2.1.1) de 100% au premier pas de temps jusqu'à 20% [56] ou presque 0% [55] au dernier pas de temps. Cette méthode peut être valable si les mesures de décarbonation considérées agissent sur les causes de la différence d'émissions (les différences de nature et quantité d'énergie de fabrication, la différence des émissions inhérentes aux procédés de fabrication, et la différence de quantité des matériaux utilisés). Les technologies de

capture du carbone peuvent aussi combler ces différences. Les données sont manquantes pour modéliser l'évolution technologique, mais la négliger peut surestimer les avantages des futures substitutions [56].

Un autre aspect dynamique, qui est directement lié au bois, est la séquestration du carbone atmosphérique lors de la photosynthèse de la biomasse [57], [58]. Puisque le carbone atmosphérique est stocké pendant la croissance de l'arbre, l'utilisation de produits en bois crée un puits de carbone temporaire dans l'anthroposphère avant une émission potentielle dans l'atmosphère. L'intensité de cette émission dépendant de la quantité des produits en bois et de leur durée de vie avant leur décomposition ou incinération.

L'évaluation de la séquestration temporaire du carbone avec des facteurs de caractérisation statiques (sur un horizon temporel fixe sur 20, 100 ou 500 ans) conduit à la neutralité du carbone biogénique en raison de deux conditions. Premièrement, on suppose que le carbone séquestré à partir du CO₂ atmosphérique retournera dans l'atmosphère sous la même forme à la fin de la vie du produit en bois. Cependant, dans le cas du recyclage du produit en bois, la durée de stockage du carbone est prolongée. Et à l'opposé, dans le cas de la mise en décharge, la biodégradation du bois peut aussi produire du méthane [59]–[62]. Deuxièmement, les facteurs de caractérisation statiques considèrent l'impact potentiel de chaque gaz à effet de serre (GES) à un horizon temporel fixe (20, 100 ou 500 ans), indépendamment du moment auquel se produisent la capture et l'émission du GES. Par conséquent, l'influence de l'absorption et de la libération de carbone pendant ou après la période d'évaluation n'est pas prise en compte. Dans leur revue de littérature, Røyne *et al.* (2016) ont montré que seulement 3 % des études tenaient compte de la chronologie des émissions de GES et de la séquestration du carbone [63]. Mais il y a un consensus émergeant en faveur des approches dynamiques pour aider à combler les lacunes dans l'ACV des bâtiments et l'évaluation du carbone biogénique [64].

Plusieurs études ont amélioré les évaluations temporelles par une modélisation dynamique de l'ICV et des facteurs de caractérisation du changement climatique (CC). Levasseur *et al.* ont présenté une méthode de calcul sans horizon temporel fixe [65]. Comme les facteurs de caractérisation statiques, la méthode utilise le forçage radiatif absolu des GES selon le modèle de Bern 2.5CC pour le CO₂ [66] et une fonction de réponse impulsionale spécifique du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour les GES autres que le CO₂.

[67]. Le forçage radiatif (w.m^{-2}) de l'inventaire peut être comparé au forçage radiatif d'une unité de CO₂ pour donner un résultat dynamique relatif en équivalent CO₂. Une étude de cas montre que les résultats sont sensibles à l'indicateur de changement climatique [54]. Pour un produit biosourcé à croissance rapide (1 an), Zieger *et al.* (2020) recommandent l'utilisation d'un indicateur absolue pour éviter les interprétations trompeuses [61]. D'autres chercheurs, tels que Kirschbaum (2014) [68] et Tiruta-Barna (2021) [69] ont étudié des approches dynamiques basées sur des mesures de changement de température. Ces mesures vont plus loin que le forçage radiatif dans la chaîne des causes et des effets du CC.

Cherubini *et al.* (2011) ont combiné un modèle de croissance de la biomasse avec le modèle Bern 2.5CC. Alors que le premier modèle considère l'absorption de carbone par les arbres qui seront transformés en produits du bois, le second modélise l'élimination du carbone par l'océan et la biosphère terrestre [70]. Le modèle de croissance de la biomasse comporte deux paramètres clés : le moment de l'absorption du carbone et la durée de la croissance de la biomasse. L'absorption du carbone peut se modéliser avant ou après la récolte du bois [59], [60], [71], [72]. Le cas du stockage après s'applique si la gestion durable des forêts garantit que de nouveaux arbres sont plantés après la récolte. Cependant, ce scénario d'absorption du carbone après la récolte conduit à un cumul du forçage radiatif plus élevé que celui avant. Puisqu'il donne un résultat conservateur, les études devraient privilégier le scénario après la récolte si la gestion forestière est inconnue. Dans ce scénario, à l'échelle d'un bâtiment, dont l'inventaire n'est pas uniquement composé de bois, le cumul du forçage radiatif est positif [59], [71]. Pour un bâtiment qui comprend de la rénovation, le cumul est également positif [72]. A l'échelle d'un produit entièrement en bois, le cumul du forçage radiatif devient négatif si une partie du carbone séquestré est considérée être retenue en permanence dans le sol. Dans le cas où le carbone ne serait pas séquestré dans le sol, l'impact ne deviendrait pas négatif [60]. Le cumul du forçage radiatif n'est pas étudié à l'échelle d'un stockage croissant de produit en bois à longue durée de vie dans le cas d'une régénération forestière après la récolte. La création du stock avant que les premiers produits en bois ne soient disponibles en fin de vie pour de nouveaux débouchés aiderait à maintenir l'avantage de la séquestration. Pour cette échelle, la disponibilité et l'approvisionnement des ressources et des produits en fin de vie sont des questions qui peuvent être soulevées par l'AFM [12] et ACV-C [7], [73]–[75]. En ce qui concerne la durée d'absorption du carbone pendant la croissance de la biomasse, certaines études concluent que le

stockage du carbone dans les ressources à croissance rapide est plus efficace pour atténuer le changement climatique que dans les ressources à croissance lente [76], [77]. Pour d'autres auteurs, la différence est moins probante car les résultats des deux cas restent dans le même ordre de grandeur [61].

Le stockage temporaire du carbone n'entraîne pas toujours des avantages en termes de CC [76], notamment car ces avantages disparaissent à l'horizon de temps infini [78]. Si un avantage existe, il dépend des scénarios de fin de vie tels que la mise en décharge où le stockage peut être permanent [72]. Selon Head *et al.* (2020), avec l'approche attributionnelle, les produits du bois apportent généralement un bénéfice au CC lorsque la séquestration du carbone est considérée. Puisque cela peut encourager l'utilisation croissante du bois et engendrer une pression accrue sur les ministères responsables de la gestion forestière dans le but d'augmenter l'autorisation de coupe annuelle, ces avantages devraient être évalués dans une perspective conséquentielle [50].

Pour pouvoir considérer la séquestration temporaire du carbone dans un stock de bâtiment croissant puis qui atteint progressivement sa fin de vie, l'analyse des flux de matières dynamique peut aider à comptabiliser les produits en bois qui s'accumulent dans un stock anthropique et le quittent au cours du temps. Cette accumulation permet un stock de carbone temporaire avant une émission potentielle du carbone biogénique dans l'atmosphère selon le traitement des produits bois en fin de vie.

Les études abordées dans cette partie non plus ne présentent pas toutes concrètement le type d'ACV utilisée (attributionnelle ou conséquentielle) et semblent être attributionnelles. En ACV-A, lors de la comparaison entre un bâtiment conventionnel et un nouveau, le résultat présente la différence d'impact qui est attribuable au cours normal des affaires. Cependant, cela ne montre pas l'impact des processus utilisés ou évités pour faire ce changement.

2.2 Analyse des flux de matières

L'analyse des flux de matières (AFM) est un outil permettant de quantifier les flux et les stocks de matières. Elle est largement appliquée pour étudier l'utilisation des ressources, les pertes de matières et la gestion des déchets [79]. Selon Parobek *et al.* (2014), l'analyse des flux de bois aborde généralement la consommation des ressources, mais pas une désagrégation pour les produits car les données officielles ne couvrent ni les canaux de distribution individuels dans les

différents secteurs ni les produits achetés par les consommateurs individuels. Cela renforce l'idée que l'analyse des flux de bois nécessite davantage de recherches empiriques et de collecte de données [80]. Lier l'estimation désagrégée de la consommation des matériaux de construction avec les bases de données de la chaîne d'approvisionnement permet d'entamer une analyse des flux de matières, notamment pour comprendre le potentiel du secteur selon la capacité de la chaîne d'approvisionnement et la disponibilité des ressources. Ceci est important car la concurrence entre les produits et les secteurs affecte la disponibilité des ressources et donc l'environnement et la durabilité [81].

La quantification des flux de matière dans le secteur du bâtiment est limitée aux bâtiments résidentiels en raison d'un manque de données pour les bâtiments NR [82], [83]. La littérature rapporte que l'évolution du parc immobilier ne dépend pas des mêmes paramètres qui déterminent la consommation de matériaux du secteur résidentiel. En effet, le parc immobilier NR dépend de l'activité industrielle ou de la concentration des sièges sociaux dans certaines villes [83]. Même si les méthodes peuvent varier en fonction des hypothèses et des données disponibles, une tendance générale existe dans la méthodologie. La principale approche méthodologique pour étudier les flux et les stocks actuels est une approche ascendante comprenant les trois étapes suivantes :

- 1) Estimation des indicateurs de composition des matériaux (ICM - principalement en kg/m^2) concernant les différents archétypes de bâtiments de la cohorte évaluée ;
- 2) Estimation de la taille physique du parc immobilier en termes d'une unité de mesure (telle que la surface totale de plancher - m^2) ;
- 3) Multiplication des deux premiers points pour obtenir l'inventaire des matériaux [84]–[87]. La littérature mentionne clairement un manque de recherche pour les ICM pour les bâtiments NR [84].

Pour certaines études portant sur les bâtiments NR, la méthode est la même que celle communément utilisée pour les bâtiments résidentiels (surface totale des bâtiments multipliée par l'intensité des matériaux (kg/m^2) par type de bâtiment [86], [88]. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, les auteurs utilisent d'autres approximations. Lichtensteiger et Baccini ont mené leurs propres investigations pour estimer la composition matérielle des bâtiments NR en Suisse [89]. Une autre approche pour créer des informations sur la composition matérielle du

type de parc immobilier NR considère l'utilisation de systèmes d'information géographique (SIG). Schebek *et al.* ont combiné des données spatiales existantes et des données obtenues à partir d'études de cas réels pour aider à représenter différentes typologies de la région Rhin-Main en Allemagne. Le SIG a été réalisé sur la base de la combinaison de ces données [90]. Tanikawa et Hashimoto (2009) ont également estimé le stock de matériaux en utilisant des données SIG à l'échelle urbaine (Manchester au Royaume-Uni et Wakayama au Japon) [91]. En plus des paramètres physiques, les paramètres économiques donnent d'autres indications. Pour séparer la part des produits du bois pour les bâtiments NR parmi la demande totale de construction, Nepal *et al.* (2016) ont introduit le changement annuel de la demande et l'élasticité des prix de la demande totale et de la demande NR des Etats-Unis [36]. Ortlepp *et al.* (2015) ont estimé le volume brut à l'échelle régionale. Avec des données économiques telles que le stock brut d'actifs fixes, leur procédure a suivi trois étapes principales : a) l'utilisation de l'estimation de la valeur des bâtiments non domestiques de l'Allemagne (en termes monétaires) avec des données de comptabilité nationale ; b) la transformation des valeurs monétaires en quantités physiques (m^2 de surface au sol), avec des facteurs de corrélation ; et c) l'attribution du plancher total de chaque type de bâtiment [84]. Une autre estimation avec des valeurs monétaires considère le permis de construire avec la part de structure en bois et le prix du bois au Québec (Canada) [1]. La formule proposée implique une surestimation de la quantité de bois dans les structures des bâtiments car elle prend en compte le prix du bois d'œuvre au lieu du prix de la structure en bois installée. Pour apporter plus de représentativité, il est recommandé d'adapter cette donnée. Ces autres méthodes peuvent renforcer celles utilisant les ICM, ou bien apporter une critique.

Les ICM des bâtiments NR sont beaucoup moins connus. De plus, dans les bâtiments NR, le principal défi pour l'ICM est que les bâtiments couvrent une large gamme de fonctionnalités, de tailles et d'exigences de sécurité. Le Tableau 2. 1 présente un résumé des méthodes de la littérature utilisées pour quantifier les matériaux dans un ensemble de bâtiments.

Tableau 2. 1 : Résumé des méthodes de quantification des matériaux dans un ensemble de bâtiment

Bâtiments	Références	Méthode (pays). [ICM de bois utilisé si disponible]
Résidentiel, publique, et industriel	Yang <i>et al.</i> (2020)[92]	Production de ICM à partir de cas d'études pour faire une base de données (Chine). [4.3 ; 76.2] kg/m ² selon le type de bâtiment NR.
Résidentiel et commercial	Heeren and Fishman (2019)[93]	Production de ICM à partir de cas d'études pour faire une base de données (monde).
Résidentiel	Schiller <i>et al.</i> (2019)[94]	Transfert de ICM d'une région à une autre (Allemagne et Japon). ICM dérivés de [84] et [91].
Non résidentiel	Schebek <i>et al.</i> (2017)[90]	Combinaison de données spatiales existantes et de données dérivées d'études de cas réels (dont [84]) pour représenter la quantité des matériaux selon différentes typologies (région Rhin-Main, Allemagne). [0 ; 21.73] kg/m ³ selon le type de bâtiment NR.
	Nepal <i>et al.</i> (2016)[36]	Quantité totale du bois dans les bâtiments résidentiels et non résidentiels désagrégée par l'élasticité des prix de la demande totale et NR (Etats-Unis).
	Ortlepp <i>et al.</i> (2015)[84]	Production de ICM avec la quantité totale du bois dans les bâtiments résidentiels et non résidentiels désagrégée par des données de comptabilité nationale (Allemagne). [1.84] k/m ² pour le mur extérieur d'une usine.
	Tanikawa and Hashimoto (2009)[91]	Utilisation de données SIG à l'échelle urbaine (Manchester au Royaume-Uni et Wakayama au Japon). Dérivé de la littérature : [16 ; 35] kg/m ² pour le Royaume-Uni et [11 ; 18] kg/m ² pour le Japon selon le type de bâtiment NR.
	Geskin Conseil (2008)[1]	Permis de construire des bâtiments non résidentiels et prix du bois d'œuvre (Québec, Canada). Prix du bois d'œuvre 500 \$/Mpmp, soit environ 212 \$/m ³ .
	Lichtensteiger and Baccini (2008)[89]	Production de ICM par la connaissance architecturale des systèmes de construction des différentes périodes et à partir de cas d'études (Suisse).

Lorsque la consommation des matériaux de construction est estimée, la projection de cette consommation est un autre défi. Il faut pour cela identifier les "moteurs" de la consommation. Ces moteurs sont des paramètres déterminants qui influencent la consommation du secteur. Le principal moteur dans les pays développés est la population [36], [88], [95], [96]. Avec ce

paramètre, le produit intérieur brut (PIB) ou d'autres indicateurs macroéconomiques du secteur (surface par habitant - m^2/P) sont également des paramètres de quantification des activités humaines. Ils agissent comme des forces motrices dans les études de changement à long terme [88]. L'équation 2. 1 décrit l'équation communément utilisée pour étudier l'impact des activités humaines sur les paramètres,

$$I = P * A * T \quad (2. 1)$$

Avec I l'indicateur d'impact, P la population, A l'affluence (tel que le PIB ou la surface par habitant). Ces deux paramètres (P and A) sont majoritairement disponibles dans les statistiques annuelles nationales et aident à établir l'échelle de l'étude et la projection. Le dernier paramètre (T) caractérise la technologie telle que l'indicateur de composition des matériaux (ICM). La projection de la consommation peut donc impliquer la projection de ces trois paramètres. Deux approches existent pour la projection des flux en fonction des paramètres et de leur disponibilité historique. Ces approches sont soit rétrospectives, soit prospectives (avec des scénarios exploratoires) [34]. La rétrospective présente un faible niveau d'incertitude car elle suppose que les tendances historiques sont représentatives des scénarios futurs (surtout pour un horizon temporel relativement court) [33]. La prospective fait surtout référence aux développements futurs attendus [34].

2.3 Synthèse des lacunes

A partir de la revue de littérature, une synthèse des lacunes mentionnées précédemment est présentée. Elles concernent l'ACV et l'AFM du bois dans les bâtiments. Plus spécifiquement, le manque d'ACV-conséquentielle, d'ACV dynamique, d'évaluation du stock de bâtiments non résidentiels à l'échelle d'une région, d'études sur les bâtiments non résidentiels, et de modélisation de la substitution des matériaux de construction sont mis en avant.

- Les résultats d'ACV-A suggèrent que la substitution de matériaux de construction conventionnels par des produits structurels en bois doit être considéré dans la modélisation. Aussi, certains indicateurs d'impact sont moins abordés dans la littérature. D'autres indicateurs de dommages doivent être considérés.
- Des facteurs de déplacement existent. Ils représentent la masse évitée de CO₂eq., GES, ou carbone par le produit en bois utilisé. Ces facteurs sont exprimés en kg CO₂eq. (ou kg de carbone) évité par kg CO₂eq. (ou kg C) contenus dans les produits de bois. Ils contiennent donc les sources d'incertitudes typiques des ACV-A. Il serait incohérent de les utiliser pour d'autres cas d'études que ceux ayant servi à leur élaboration car les frontières du système ou les quantités de matériaux déplacés seraient différentes. De plus, ils ne permettent pas de connaître le déplacement des autres impacts environnementaux. Pour permettre l'évaluation de la substitution de matériaux de construction sur d'autres cas d'études et d'autres impacts, il faudrait estimer la quantité des matières substituées par quantité unitaire de la matière ajoutée. Ces facteurs de substitution matière peuvent alors être appliqués à la quantité de référence ajoutée qui représente la performance structurelle des matériaux substitués du cas d'étude.
- Les évaluations à l'échelle d'une structure spécifique ou du bâtiment sont difficilement extrapolables. Un examen des déplacements d'impact potentiels des structures en bois avec des facteurs de substitution considérant une variabilité des structures est nécessaire.
- La prise en compte des effets d'ordre de grandeur supérieure de la substitution progressive des matériaux, en dehors des limites du secteur du bâtiment, est moins abordée dans la littérature sur le bâtiment. Ces effets d'ordre supérieur peuvent inclure des changements dans l'offre des ressources en fonction des limitations et des contraintes des fournisseurs.

- Le cumul du forçage radiatif n'est pas étudié à l'échelle d'un stockage croissant de produit en bois à longue durée de vie dans le cas d'une régénération forestière après la récolte. La création du stock avant que les premiers produits en bois ne soient disponibles en fin de vie pour de nouveaux débouchés aiderait à maintenir l'avantage de la séquestration. Pour cette échelle, la disponibilité et l'approvisionnement des ressources et des produits en fin de vie sont des questions qui peuvent être soulevées par l'AFM [12] et ACV-C [7], [73]–[75].
- Jusqu'à présent, la littérature présente différentes évaluations statiques et dynamiques de la performance du bois par rapport à d'autres matériaux fonctionnellement équivalents en utilisant une ACV-A (facteur de déplacement ou comparaison de bâtiments) ou sans spécifier si l'approche est conséquentielle. En ACV-A, lors de la comparaison entre un bâtiment conventionnel et un nouveau, le résultat présente la différence d'impact qui est attribuable au cours normal des affaires. Cependant, cela ne montre pas l'impact des processus impliqués ou évités par le changement.
- Les études devraient considérer l'approche conséquentielle pour améliorer la compréhension de la dynamique du marché et des scénarios d'approvisionnement lors de l'augmentation de l'utilisation du bois dans les bâtiments [49].
- Il est apparu que malgré l'existence de nombreuses discussions théoriques sur l'ACV-C, le passage de la théorie à la pratique recevait beaucoup moins d'attention [34]. La disponibilité des données sur les différents niveaux technologiques et sur les fournisseurs marginaux est un défi en ACV-C. De plus, la possibilité de différents scénarios multiplie les flux affectés à identifier [35]. L'analyse des flux de matière peut aider à remonter la chaîne de production pour identifier les flux et voir si une augmentation de la production est possible sans limiter la disponibilité de la ressource.
- Selon Parobek *et al.* (2014), l'analyse des flux de bois aborde généralement la consommation des ressources, mais pas les produits car les données officielles ne couvrent ni les canaux de distribution individuels dans les différents secteurs ni les produits achetés par les consommateurs individuels. Cela renforce l'idée que l'analyse des flux de bois nécessite davantage de recherches empiriques et de collecte de données [80].
- La quantification des flux de matière dans le secteur du bâtiment est limitée aux bâtiments résidentiels en raison d'un manque de données pour les bâtiments NR [82], [83].

2.4 Question de recherche et objectif

Question de Recherche

A partir de la synthèse des lacunes énumérées précédemment (section 2.3), la question de recherche est la suivante :

Comment améliorer l'évaluation des conséquences environnementales d'une augmentation de l'utilisation du bois dans la construction ?

L'objectif général de ce projet de recherche est de développer un cadre de modélisation environnementale de l'utilisation croissante du bois dans la construction, en combinant la méthode d'analyse du cycle de vie conséquentielle et l'analyse des flux de matières dynamique. L'approche mise en place doit permettre de disposer d'une perspective de cycle de vie et d'une modélisation prospective de l'utilisation croissante du bois. Elle doit considérer les interactions, les dynamiques, et les contraintes caractérisant le cycle de vie du bois.

L'atteinte de cet objectif passe par les sous-objectifs suivants :

Objectif 1 : Le premier objectif vise à modéliser les flux de matières au cours du temps afin de supporter l'identification et la modélisation des conséquences associées à l'utilisation croissante du bois dans les bâtiments non résidentiels.

Objectif 2 : Le second objectif vise à modéliser la substitution de matériaux de construction par les produits de structure en bois et à caractériser les impacts environnementaux des échanges entre le système étudié (secteur de la construction bois non résidentielle) et l'écosphère (l'environnement). Ces échanges sont les flux physiques des conséquences de l'utilisation croissante du bois.

Objectif 3 : Le troisième objectif vise à modéliser la séquestration temporaire du carbone dans un roulement de stock dynamique des structures en bois (de leur production à leur fin de vie).

Les différentes étapes et les points centraux du projet de recherche sont présentés dans la Figure 2. 4 et décrits de façon détaillée dans les tableaux (Tableau 2. 2 et Tableau 2. 3). Les éléments méthodologiques menant à la réalisation de ces objectifs ainsi que les différents résultats obtenus sont exposés aux chapitres 3, 4 et 5 sous forme d'articles scientifiques.



Figure 2. 4 : Réalisation du cadre de modélisation de l'utilisation croissante du bois dans les bâtiments en ACV-C ; Flux des objectifs et outils mobilisés

Tableau 2. 2 : Description des étapes du projet de recherche et correspondances avec les chapitres et objectifs

Chapitre	Description de l'étape du projet de recherche	Objectif
Chap. 2	L'état de l'art concerne les ACV sur l'utilisation du bois et les bâtiments. Il comprend la substitution, la séquestration du carbone, les inventaires et indicateurs dynamiques, connaissances l'identification des fournisseurs marginaux. Il concerne aussi les analyses des flux de matière dont la quantification des matériaux dans les bâtiments.	Acquisition
Chap. 3	Création des paramètres pour estimer le potentiel d'utilisation (permis de construire, cout de la structure, part du cout de structure dans le cout de construction, pourcentage de bâtiment avec une structure en bois). Projection des paramètres selon l'évolution de la population (corrélée avec les permis de construire) et des scénarios d'augmentation des parts de marché du bois. 3 scénarios : min., moy., et max..	Obj. 1
Chap. 3	Intégrer l'estimation dans l'AFM du bois au Québec pour comprendre l'importance du scénario max. par rapport à la possibilité forestière et identifier la ressource non contrainte.	Obj. 1
Chap. 4	Elaboration des facteurs de substitution fonctionnelle pour le bois par rapport à la combinaison de l'acier et du béton dans les structures non résidentielles. Identifier les fournisseurs des matériaux substitués qui sont affectés.	Obj. 2
Chap. 4	Evaluer les impacts de la production croissante du bois couplée à la production substituée des autres matériaux de construction selon 3 facteurs de substitution (min., moy, et max.).	Obj. 2

Tableau 2. 3 : Description des étapes du projet de recherche et correspondances avec les chapitres et objectifs - suite

Chapitre	Description de l'étape du projet de recherche	Objectif
Chap. 5	Modélisation de la croissance des arbres et de la séquestration du carbone.	Obj. 3
Chap. 5	Modélisation dynamique roulement de stock des structures.	Obj. 3
Chap. 5	Modélisation dynamique de la fin de vie des structures, et identification des fournisseurs affectés en fin de vie.	Obj. 3
Chap. 5	Couplage de l'ICV-C avec la caractérisation dynamique du CC pour évaluer l'impact sur le changement climatique.	Obj. 3

CHAPITRE 3 : APPROCHE QUANTITATIVE DU POTENTIEL D'UTILISATION DU BOIS DANS LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES

Avant-propos

Auteurs et affiliation.

Sylvain Cordier, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada - AND - NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

François Robichaud, Forest Economic Advisors, LLC, 298 Great Road, Littleton, MA 01460, USA

Pierre Blanchet, NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

Ben Amor, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada

Date d'acceptation : 7 décembre 2019

État de l'acceptation : Version finale publiée

Référence : Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2020. Exploring the Regional-scale Potential of the Use of Wood Products in Nonresidential Buildings: A Building Permits-based Quantitative Approach. BioResources. 15(1), 787-813. DOI: 10.15376/biores.15.1.787-813

Titre en français : Exploration du potentiel à l'échelle régionale de l'utilisation des produits du bois dans les bâtiments non résidentiels : Une approche quantitative fondée sur les permis de construire.

Contribution au document :

Ce chapitre présente le cadre proposé pour établir le flux de référence principal pour un inventaire du cycle de vie conséquentiel portant sur l'utilisation des matériaux structuraux dans les bâtiments non résidentiels. Ce flux est la quantité de bois dans les structures non résidentielles. En premier lieu, les paramètres d'affluence (A), et technologie (T) du modèle IPAT sont adaptés pour faire face à l'absence de données habituellement utilisées dans le secteur du bâtiment. Ces paramètres sont ensuite associés au reste du modèle IPAT. Dans un second temps, la projection du flux de référence (quantité de bois) est effectuée avec la projection de la population, les tendances des paramètres, et le scénario de la proportion croissante de bois dans les structures non résidentielles.

Les résultats démontrent le rôle majeur des paramètres liés au coût de la structure sur la quantité de bois. Ils montrent également l'importance de l'estimation de la récolte nécessaire par rapport à la récolte totale des résineux au Québec. Différentes analyses de sensibilité ont été réalisées pour connaître l'influence des paramètres principaux sur le résultat : (i) la variabilité du résultat par rapport aux valeurs minimum et maximum des principaux paramètres; (ii) choix du scénario de la proportion croissante de bois dans les structures non résidentielles; (iii) la mise en perspective de la récolte nécessaire par rapport à la possibilité forestière et la récolte totale des résineux pour la consommation domestique et les exportations.

Résumé :

Dans le secteur de la construction, les produits en bois suscitent un intérêt croissant. Des méthodes sont nécessaires pour quantifier l'utilisation des matériaux et évaluer leurs effets potentiels. Lors de la quantification de la consommation de matériaux de construction, de nombreuses études se limitent aux bâtiments résidentiels en raison du manque de données pour les bâtiments non résidentiels. Cette recherche visait à étudier une méthodologie permettant de prendre en compte la consommation de matériaux de construction non résidentiels. Une méthode d'estimation du volume de produits en bois dans les structures des nouveaux bâtiments non résidentiels a été présentée. Ensuite, des projections de l'estimation ont été proposées selon trois scénarios (minimum, moyen et maximum). Des analyses de sensibilité ont mis en évidence les paramètres qui présentent la plus grande contribution aux scénarios. L'importance relative de l'estimation pour la récolte totale de tous les marchés du bois a également été évaluée. Malgré

la grande incertitude de la consommation de bois pour les structures de bâtiments non résidentiels, l'estimation a une faible contribution sur la récolte totale de la province de Québec. Les résultats ont montré comment et quand la disponibilité de la ressource peut être limitée en fonction des hypothèses. Cette méthode peut servir à l'inventaire du cycle de vie dans le cadre d'une évaluation environnementale ou d'une analyse des flux de bois, mais des recherches supplémentaires sur la composition des matériaux des archétypes de bâtiments non résidentiels sont nécessaires.

Abstract:

In the construction sector, wood products are gaining interest. Methods are necessary to quantify material use and evaluate their potential effects. When quantifying the building material consumption, many studies are limited to residential buildings due to the lack of data for non-residential buildings. This research aimed at investigating a methodology to account for non-residential building material consumption. A method to estimate the volume of wood products in the structures of the new non-residential buildings was presented. Then, projections of the estimation were suggested according to three scenarios (minimum, average, and maximum). Sensitivity analyses highlighted the parameters that present the greatest contribution to the scenarios. The relative importance of the estimation to the total harvesting of all wood markets was also assessed. Despite the high uncertainty in wood consumption for non-residential building structures, the estimation had a small weight on the total harvesting of the Quebec province. The results showed how and when the resource availability could be constrained depending on the assumptions. This method can serve for life cycle inventory for an environmental assessment or wood flow analysis, but more research on the material composition of the non-residential building archetypes is necessary.

Keywords : Non-residential buildings; Structure; Wood products; Wood building; Building stock.

Exploring the Regional-scale Potential of the Use of Wood Products in Nonresidential Buildings: A Building Permits-based Quantitative Approach.

3.1 Introduction

Interest in wood has been increasing in the construction sector. Indeed, Gosselin *et al.* (2017) recently documented increased motivation for the use of wood in construction (including the decrease of barriers and their change over time) [97]. This is mainly explained by the improvement of wood products in recent years with respect to environmental and technical properties [98], as well as fire performance [99], including different building code implementation, and expertise [1], [100]–[102]. The availability of materials in the market is also seen as a main driver for the use of wood in the US region [103]. The cost also may be as much of a motivation [104] as it is a barrier. In Quebec, main factors that could contribute to the use of wood are technical design guides, ongoing training, structural costs, and ease of its estimation [100].

In Quebec, the Wood Charter provides a roadmap to increase the use of wood in non-residential (NR) construction [3]. In single-family houses, where around 1 to 2 floors are the norm, light-frame wood construction represents approximately 90% of this sector. For NR buildings, some surveys estimate the market share (28% of buildings, of 4 stories and less, have wood structure [100]), but the amount of wood that is used is still unknown. With the Wood Charter, the government and wood companies work to increase its consumption in NR buildings. In addition to technological advances and the synergy established between industrial and institutional players, examples of high and medium height wooden buildings and the continuous public communication (e.g., the use of wood magazines) can play a role in the acceptance of high-rise wood buildings. Indeed, the above examples demonstrate the feasibility of wood-based structures for high-rise buildings in North America (e.g., in British Columbia with the Brock Common and the Wood Innovation and Design Centre (WIDC), the T3 office building in Minneapolis, and in Quebec, the Origine, etc.). However, these examples may represent a technical reality at the scale of the building itself but not a large-scale feasibility for an entire building cohort. This emerging market, supported by private and institutional investments and

by governmental initiatives, may imply changes in the supply chain of raw materials and in the management of wood products. Therefore, it is necessary to understand wood product flows at the economic sector scale as an important step for policy measurement. For environmental assessments or other anthropological activity assessments, an inventory of wood product flows in the NR building stock is necessary. However, methods are needed to quantify wood consumption.

3.2 Research background and objective

The following subsections present different aspects of research focusing on the temporal quantification of wood material in the building sector.

3.2.1 Building material consumption

When quantifying the building material consumption, many studies are limited to residential buildings due to the lack of data for non-residential buildings [82], [83]. The literature reports that the building stock evolution does not depend on the same parameters that drive the material consumption of the residential sector. Indeed, the non-residential building stock depends on the industrial activity or the concentration of headquarters in specific cities [83]. Even if the methods may vary related to assumptions and available data, an overall trend exists in the methodology. The main methodological approach for studying current flows and stocks is a bottom-up approach involving the following three steps:

- 1) Estimating characteristic material compositions indicators (MCIs - mainly in kg/m²) regarding the various building archetypes in the cohort under assessment;
- 2) Estimating the physical size of the building stock in terms of one unit measure (such as total floor space – m²);
- 3) Multiplying the two first points to obtain the inventory of materials [84]–[87]. The literature itself clearly mentions a lack of research for MCIs for non-residential buildings [84].

For studies focusing on the NR buildings, [36], [84], [88], the method is the same as the common one for residential buildings (i.e., total surface area of buildings multiplied by the material intensity (kg/m²) per building type [86]). When data is not already available, authors use other

proxies. Lichtensteiger and Baccini did their own investigations to estimate the material content of NR buildings [89]. Another approach to creating information on the material composition of NR building stock type considers the use of geographical information systems (GIS). Schebek *et al.* have combined existing spatial data and data gained from real case studies investigations to help represent different typologies. The GIS was carried out based on the combination of those data [90]. Tanikawa and Hashimoto (2009) also estimated the material stock using urban-scale GIS data. In addition to physical parameters, economical parameters give other insights. To separate the portion of wood products for NR buildings among the total construction demand, Nepal *et al.* (2015) introduced the yearly shift in demand and the price elasticity of the total and the NR demand [105]. Ortlepp *et al.* (2016) estimated the area-wide gross volume in terms of regional floor space. They broke it down into building types with a monetary value. With economic data such as the gross stock of fixed assets, their procedure followed three main steps: a) the use of Germany's non-domestic buildings value estimation (in monetary terms) with national accounting data (VGR); b) the transformation of monetary values into physical quantities (m^2 floor space), with correlation factors; and c) the allocation of the total floor to each building. Another estimation with monetary values considers the building permit with the share of wood structure and the price of lumber [1]. The suggested formula implies an overestimation of wood in building structures because it considers the price of lumber instead of the price of the installed wood structure. This current paper highlighted that MCIs of NR buildings are far less known. However, in NR buildings, the main challenge for the MCI is that the buildings cover a large disparate range of functionalities, sizes, and safety requirements.

3.2.2 Drivers identification and projection

When building material consumption is estimated, projecting this consumption is another challenge. It requires identifying the “drivers” of the consumption. These drivers are determinant parameters influencing the consumption of the sector. The main driver in developed countries is the population [36], [88], [95], [96]. With this parameter, the gross domestic product (GDP) or other macroeconomic indicators of the sector (e.g., the area per capita in m^2/P) are also determinant parameters illustrating human activities. They act as driving forces in long-term change studies [88]. Equation 3. 1 describes the commonly used equation to study the impact of human activities with the parameters,

$$I = P * A * T \quad (3.1)$$

where I is the indicator of Impact, P is the population, A is the affluence (such as GDP/P or m^2/P , etc.). Those two parameters (P and A) are commonly available in yearly statistics and help to set the scale of the studied sector and to drive its evolution. The last parameter (T) stands for the technology, such as the material intensity (such as the MCI).

Thus, projecting the consumption can imply projecting those three parameters. Two approaches exist for the projection of the flows depending on the parameters and its historical availability. The approaches are either retrospective or prospective (with exploratory scenarios) [34]. Retrospective presents a low level of uncertainty because it assumes that the historical trends are representative for future scenarios (especially for a relatively short time horizon) [33]. Prospective mostly refers to expected future developments [34].

3.2.3 Upstream of the building sector

Material flow analysis (MFA) is a tool to quantify the flows and stocks of materials in arbitrarily complex systems. It is widely applied to investigate resource use, material losses, and waste management [79]. According to Parobek *et al.* (2014), wood flow analysis generally tackles resource use but seldom products, because official data neither cover individual distribution channels in different sectors nor products purchased by individual consumers. This reinforces that wood flow analysis requires more empirical research and data collection [80]. Combining the building material consumption with supply chain databases helps to complete a life cycle wood flow analysis (LCWFA) downstream of the supply chain. Moreover, by doing so, it is possible to understand the potential of a sector regarding the supply chain capacity and resource availability. This is important because the competition between products and sectors affects the resource availability and thus the environment and sustainability [81].

3.2.4 Objective

To the best of the authors' knowledge, studies have been mainly focused on residential buildings. This is mainly due to the data availability such as the average square meter per capita and the MCI. Few researchers have focused on NR buildings at a large scale, mainly due to a lack of data. Therefore, the objective of this paper is to propose a methodology to build an inventory of NR buildings wood consumption. The authors aim at exploring the effect of the

parameters and what their range can represent on the estimation. Such methodology will help give an estimation of the amount of structural wood products in new NR buildings and build a wood flow analysis downstream of the supply chain. This work is further dedicated to a life cycle assessment (LCA) of structural woods in non-residential buildings at a large scale, and to a LCWFA at a regional scale.

3.3 Methodology

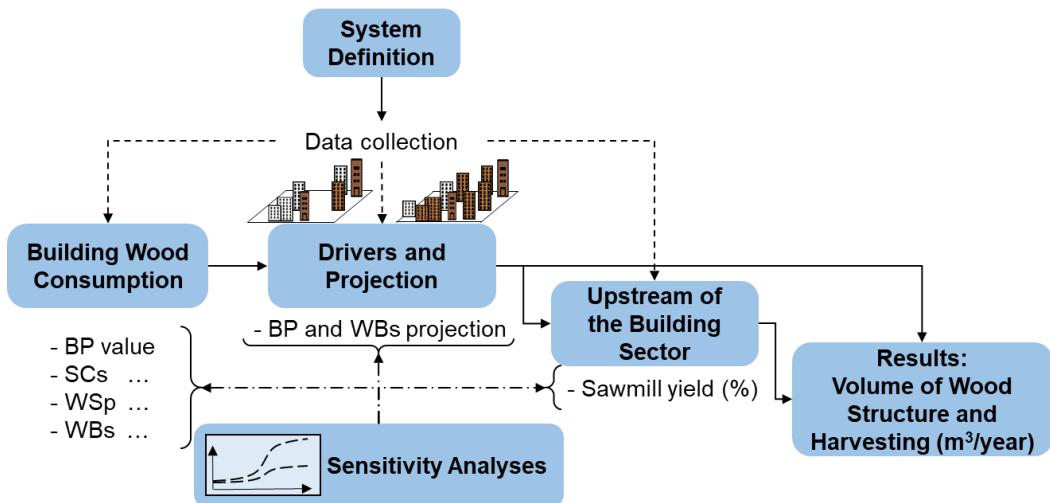


Figure 3. 1 : Overview of the suggested methodology (with BP standing for the building permits for new constructions, SCs for the structural cost share, WSp for the wood structure price, and WBs for the wood building share)

The following subsections explain in more details the proposed methodology. All the results were obtained using an Excel parametrized master file.

3.3.1 System definition

Quebec is the geographical boundary of the building sector. The period from 2010 to 2050 is the temporal boundary of the harvesting wood demand for the new NR building structures. The system includes the stages of harvesting, transforming (1st and 2nd), and manufacturing of structural products. These stages consider the softwood structural products such as cross-laminated timber (CLT), glued-laminated timber (Glulam), or roof frame. The material losses during the first transformation in the sawmills are included, and only the softwood is considered.

3.3.2 Building wood consumption

The aim is to present a methodology to estimate an inventory of NR buildings stock whose concept and parameters are extracted and adapted from Geskin Conseil (2008). This methodology is applied to the structural wood products in NR buildings. Following the idea of Eq. 3. 1, Eq. 3. 2 presents the relation between parameters that scale the amount of a material used per unit of structure up to the regional scale,

$$\text{Estimation of structural wood } (m^3) = \frac{BP (\$) * SCs (\%) * WBs (\%)}{WSp (\frac{\$}{m^3})} \quad (3. 2)$$

where the parameter BP is the value of the building permits of new NR buildings (\$). It aims to represent the spending and the size of this sector, SCs is the structural cost share (%), WBs is the wood building share, and WSp is the wood structure price (\$/m³). The elaboration of a building permit form comes when there is an intention to build [1], [106] that tends to materialize. Indeed, building permit data serve as a leading indicator for the construction industry because obtaining a building permit is one of the first steps in the construction process. It is also a major input of expenditures by companies and governments for building construction [106] and strongly correlated with the investments in NR construction ($R^2 = 0.9$ is obtained when the analysis was performed; more details are available in the supplementary information (Figure A. 1; [107], [108]). Building permit value (\$) [108] does not include investments such as architectural, engineering (e.g., water, sewer, and drainage works), legal fees, and construction site preparation [109]. Thus, it is only close to the building value and not the actual perceived full value. The estimations consider the building permits for new buildings and additional structure to an existing building.

The values of the building permits consider the construction cost. The cost of the structure share SCs is the parameter to consider when estimating the cost of the structure in comparison with the total building cost. Existing NR buildings reported in public [110]–[115] confidential reviews (on behalf of the Ministry of Forests, Wildlife, and Parks) [116] allow the definition of an average value of SCs . Case studies of the confidential report include NR buildings, representing Quebec public building context.

Afterwards, the structure cost is converted into a wood quantity with WSp , the price of installed wood structure in the building (\$/m³). Existing case studies [110]–[114] helped to estimate this

parameter. They presented the price of the installed structure and the amount of wood in the structure.

The third parameters presented above (BP , SCs , and WSp) helped to determine the quantity of wood installed in all new buildings. However, the wood structure is not employed for all NR buildings. As depicted by a survey (on behalf of Cecobois), engineers and architects reported that approximately 28% of their new constructions (4 stories and less) use wood structures [100]. Therefore, the coefficient WBs considers the share of new buildings that use wood structure.

3.3.3 Drivers identification and projection

The estimation of future amounts of wood in structures uses the same equation as the quantification of wood in current structures, but with scenario analysis and assumptions on the temporal evolution of each parameter. Thus, key drivers and their potential patterns are investigated using historical data, literature reviews, and industrial and institutional reports. The building permit values and the lumber costs follow historical trends. The share of the structural cost related to the building is constant, and the share of building with wood structure follows a sinusoid. Because the parameters of equation 3. 2 evolve separately, the minimum and the maximum value of those parameters are used to simulate two extreme scenarios. More explanation on these projections follows.

In light of the correlation between the historical data of population [117] and total building permits ($R^2 = 0.918$), the authors made the projection of building permits according to existing minimum and maximum population predictions [118]. Those predictions help to build a minimum and a maximum scenario. More details are available in the supplementary information (Figure A. 1 and Figure A. 2).

The share of the structural cost among the building was assumed to be constant. Too few data are available regarding the year and type of building. As an emerging market in the province of Quebec, there is not enough information to understand how much its temporal variability is, compared to its variability according to the type of structure (or building). Moreover, because all monetary dollar values are increasing (the building permits and the price of the installed wood structure), it creates more inconsistency if the share of the structural cost is timely dependent.

Concerning the price of the installed wood structure, the average of the existing case studies was used and projected using the trend of softwood lumbers. The minimum and maximum values of the case studies were also projected.

Finally, the prospective approach to assume the building share with wood structure is exploratory. The authors used an S-curve shape, such as typical development [119] for a minimum and a maximum scenario. It uses a sinus function as Eq. 3. 3 depicts,

$$WBs(t) = \left\{ \frac{[WBs(tF) - WBs(t0)]}{2} \right\} * \left\{ \sin \left[\left(\frac{\pi}{tF-t0} \right) * \left(t - \left(\frac{t0+tF}{2} \right) \right) \right] + 1 \right\} + WBs(t0) \quad (3. 3)$$

where $WBs(t)$ is the instantaneous share of new constructions that use wood structure at the time t (year), $WBs(t0)$ is the share at the initial calculation time $t0$ (2017), and $WBs(tF)$ is the share at the final time horizon tF (2050).

3.3.4 Upstream of the building sector

From the estimations of wood amount in the NR building structures, wood flows are followed-up throughout the supply chain until harvesting to evaluate the relative weight of the structural wood demand on the other demands. The supply chain starts at the harvested wood stage (the stumps and the extracted biomass during the harvesting are excluded). To do so, the last important parameter, which is also time-dependent, is the sawmill yield. It is the highest one among the supply chain of lumber because approximately 40% of roundwood is lost in processing standard lumber. Through official statistics [120], the authors observed an improvement in the sawmill yields, which means an increase in lumber production and a decrease in the chips and the sawdust per cubic meter of roundwood. However, the wood barks per roundwood were rather constant in time. Thus, for the projection of flows, the trends were maintained. These trends may show the progressive installation improvements that the sawmills are doing to increase their efficiency. For example, they recover parts during trimming to transform them into smaller ones, they use thinner saws to make a smaller cutting thickness, and they use optimized multi-saw slitting machines - straight sawing and curve sawing [121]. However, because the lumber per roundwood cannot be equal to 1, the authors stopped the trends and supposed a constant value when one of the yields reached its minimum value according to the statistics databases [120] and reports [121]. The minimum yield of roundwood per softwood lumber is $3.46 \text{ m}^3/\text{mbf}$ (with mbf standing for the volume of the lumber in thousands of board

feet) in the region of Chaudière-Appalaches (Canada) [120]. The yield of wood barks per roundwood is an exception because it was supposed constant at its historical minimum. With the database it was possible to assess each individual yield (of lumber and each of the by-products) throughout time. However, it was not possible to cross-check their interdependence due to the diversity in the yield units and the aggregation of wood species. Therefore, to make all the yield evolutions consistent, the authors balanced the volume of lumbers per roundwood and by-products per roundwood. To do this, when the lumbers per roundwood reaches its limit and stays constant for the following years, all by-products per roundwood also become constant. The sum of yields is equal to 100%.

Finally, to understand the potential of wood in NR structures compared to the resource to harvest and the evolution of other sectors, the state of other sectors is projected. The current overriding sector of domestic harvesting is lumber exportation. Thus, the projection of the current harvesting follows the export trend.

3.3.5 Sensitivity analyses

As presented earlier, some parameters are available, but their scopes do not exactly fit with the objective. To better fit with the scope and the system boundaries, the distributions of the different parameters (according to the type of buildings, the number of stories, the type of structures, and the share of materials) would contribute to better modeling. Because of the lack of data (not enough data, not existing data or not available, and transparent data) sensitivity analyses will follow. Table A. 1, 2, 3, 4, 5 help to explain what effect the average value of the parameters may have on the results (the volume of wood products and of harvesting). Indeed, the average scenario may under-or-overestimate the results according to the scope that the parameters cover compared to the objective. At such a large scale, with such uncertain parameters, it is important to look at the main influencing parameters. In this section, figures present the ranges of the parameters around their assumed average value (Figure 3. 2, Figure 3. 3, Figure 3. 4, and Figure 3. 5). These allow for the study of the effect of each parameter and their contributions to extreme scenarios. Because the projections of parameters are also sources of uncertainties, they will be challenged.

The building permits survey is representative because it covers approximately 95% of the Canadian population in all regions. The remaining municipalities with 5% of the population are not represented, but their construction activities have little impact on the total [106]. Moreover, the survey recently disaggregated the permits by type of work [122]. The category new constructions of buildings accounted for 40.5% of the total building permits, and the additional structures to existing buildings accounted for 12.5% of the total in 2018 [108]. These shares, only available for 2018, are assumed constant for all years in the modelling. This constant shares of 53% (40.5% and 12.5%) was applied for the past data and the projection. The other categories of the type of work (Alterations, Improvements, Conversions, and Demolitions) are not new constructions needing new structures; thus, they are not used for the estimation. Another fact on building permits is that the construction of one new building can include several permits [122]. This can overestimate the figures. In 2018, additional value to previous permit(s) accounted for less than 0.1% of the total building permits [108], so this share was assumed negligible. Because a correlation exists between the building permits and the population, the population scenarios [118] helped to draw extreme scenarios of building permits as illustrated in Figure 3. 2. The equation of the building permit projections is Eq. 3. 4, with i , the type of the population projection (i.e., maximum, average, and minimum population).

$$BP \text{ for new constructions}_i = (0.405 + 0.125) * (\text{population}_i * 3.7236 - 2 * 10^7) \quad (3.4)$$

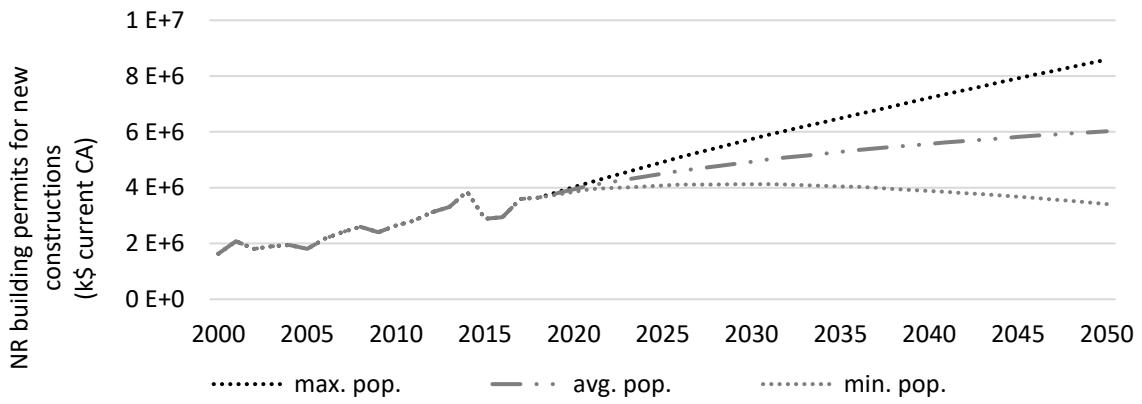


Figure 3. 2 : Building permits of the new buildings and the structural additions to existing buildings (53% of the total); Historical values: [108]; Projections: correlated with population projections [118]

Concerning the share of the *SCs* (Figure 3. 3), the authors elaborated on the distribution of the value using examples of available real case studies. Thus, the sensitivity analysis of this parameter considers the extreme values of this shape (min: 2.1%; average: 13%; max: 33.6%).

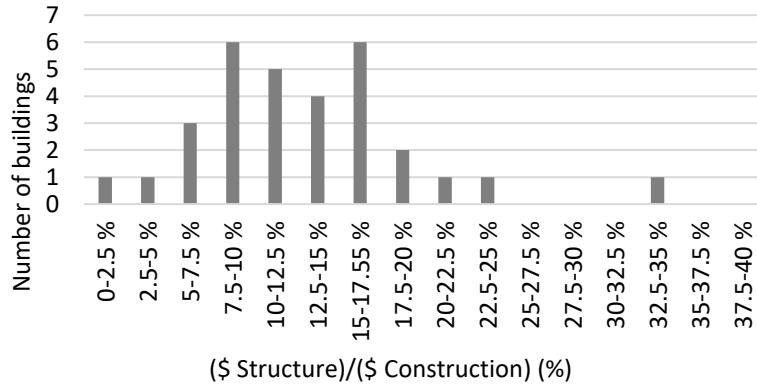


Figure 3. 3 : Distribution of the *SCs*; Extracted from case studies [110]–[116]

Some factors may influence the variability of costs, such as the building construction system (lightweight framing, glulam, CLT, or hybrid), its size (the span of the beams), the function of the building, the share of the other elements (if the building is mainly a structure), etc.

For the price per cubic meter of the wood structure, *WSp* (Figure 3. 4), it was assumed how much it is related to the softwood sawnwood to follow the sawnwood trend. The minimum and the maximum values of the case studies were also projected by following the trend of the sawnwood price per cubic meter.

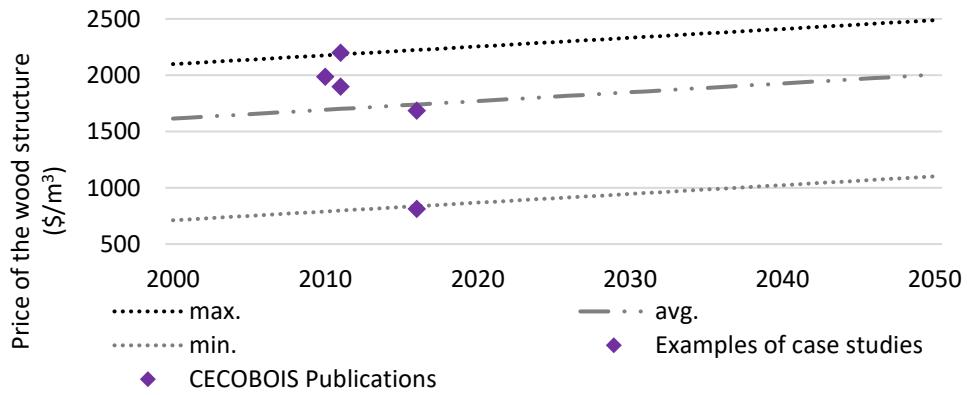


Figure 3. 4 : Range of the example of the cost of a wood structure (*WSp*); Linear trend: [123]; case studies: [110]–[114]

The share of new buildings with a wood structure, WBs (Figure 3. 5), comes from a survey that considers several parts of the structure (main structure, roof frame, and walls). The values are available for buildings with four stories or less. However, because of a lack of information on the distribution of buildings according to the stories, it was applied to all new building constructions. This implies an over-estimation of the wood amount in structures because the share is less for buildings higher than four stories [100].

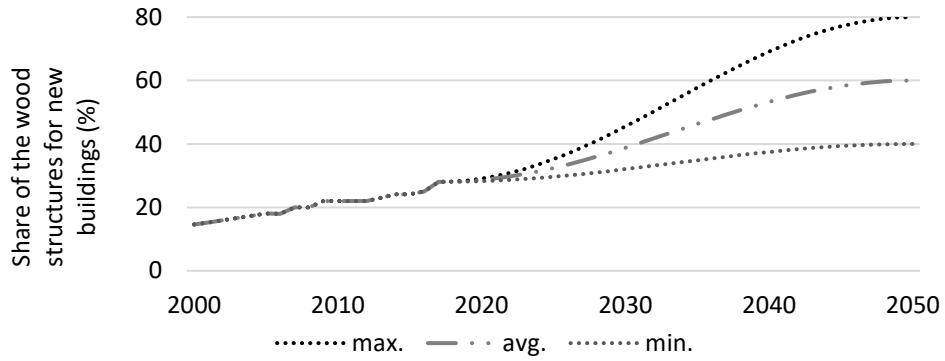


Figure 3. 5 : Share of the wood structures for new buildings (WBs); Historical values: [100]; Projections: s-curve scenarios (Eq. 3. 3)

The most uncertain main parameters are the SCs , WSp , and the WBs because of the minimal available data, the type of the structures, the number of stories, etc. Another reason is their high range between the maximum and the minimum values.

3.4 Results and discussion

The first results (Figure 3. 6, Figure 3. 7, and Figure 3. 8) illustrate the estimated amount of wood in new NR building structures. The last results (Figure 3. 9) depict the total harvesting due to the additional demand for NR structures. It allows for measurement of its related weight to other sectors demanding this resource. The results of the sensitivity analyses show just how much parameters can change and affect the results.

3.4.1 Building wood consumption

Wood in the structures of new NR buildings

Figure 3. 6 displays the estimation of wood in the new NR building structures. The scenarios consider the average evolutions of the parameters BP , SCs , WSp , and the three exploratory scenarios (min., avg., and max.) of the WBs .

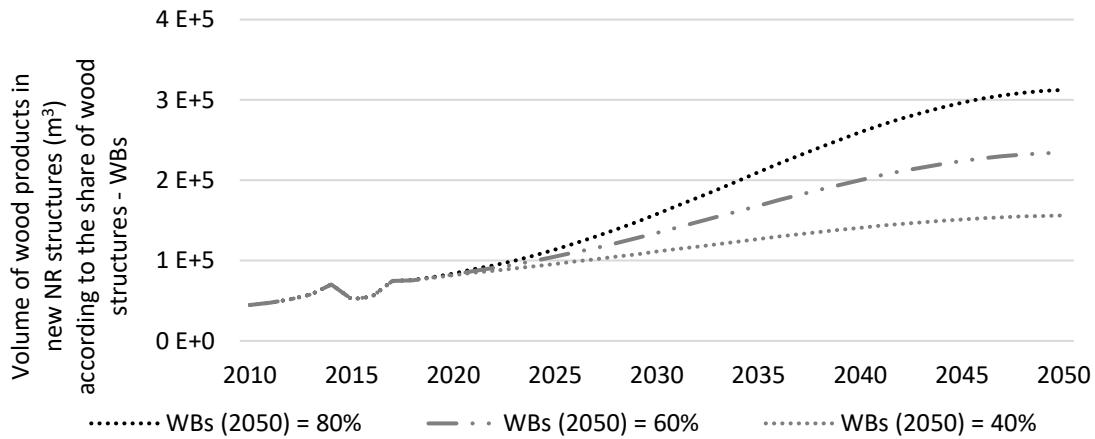


Figure 3. 6 : Estimation of wood products (m^3) in new NR structures of buildings in Quebec (new buildings and structural additions to existing buildings)

There is consistency in the sense that when wood is more expensive, it may be used less. However, price is not related to other endogenous parameters such as the availability of the resource.

Sensitivity analyses

The previous paragraphs presented the results due to the parameters of Eq. 3. 2, (*BP*, *SCs*, *WBs*, and *WSp*). Because of their uncertainties, the objective of this section is to present the sensitivity of the results due to each parameter. The effect of each parameter was studied when it changed by more or less a percentage of its value. Then, the more contributing parameters to the extreme scenarios were investigated. Finally, because projection methods are also sources of uncertainties, this issue was addressed.

First of all, it is clear that if any of one numerator of Eq. 3. 2 is changed by $\pm x\%$ of its value, the results will be changed by $\pm x\%$ of its value. If the denominator is changed by $+x\%$ or $-x\%$ of its value, the results will be respectively multiplied $\frac{1}{1+x\%}$ or $\frac{1}{1-x\%}$. This means that whatever the sensitivity applied to the *BP*, the *SCs*, or the *WBs*, the effect on the result will be the same. Moreover, the sensitivity applied on the *WSp* will have an inverse effect (either higher or lesser), as summarized in Table 3. 1 and illustrated in Figure 3. 7.

Table 3. 1 : Effect of parameters on the result

If	one numerator one denominator	is changed by	+ x%	then, the result is changed by	+ x%
			- x%		- y% ($ y < x $)
			+ x%		- x%
			- x%		+ z% ($ x < z $)

Because there is only the wood structure price (WSp) at the denominator, it is the parameter that has the least influence when it increases and the most when it decreases (with the assumption that parameters are independent).

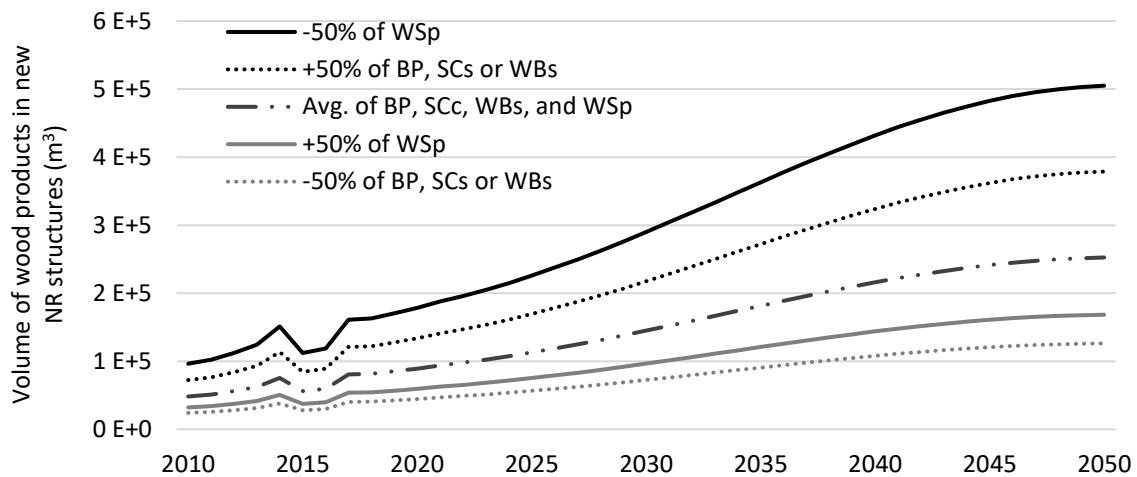


Figure 3. 7 : Sensitivity of one numerator (BP , SCs , or WBs) and the denominator (WSp)

As presented above, numerators have the same contribution to the results related to their average. However, they do not have the same interval around the average. Moreover, the interdependency between numerators and denominators is not set. The following extreme scenarios helped to frame this limitation. Table 3. 2 and 3. 3 show how much the extreme values of parameters contribute to the extreme scenarios.

Table 3. 2 : Effect of extreme values on the result in 2017

2017	<i>BP</i>	is changed by	<i>+/- 0%</i>	then, the result is changed by	<i>+/- 0%</i>
	<i>SCs</i>		<i>+ 158%</i>		<i>+ 158%</i>
	<i>WBs</i>		<i>- 84%</i>		<i>- 84%</i>
	<i>WSp</i>		<i>+/- 0%</i>		<i>+/- 0%</i>
			<i>+ 28%</i>		<i>- 22%</i>
			<i>- 52%</i>		<i>+ 107%</i>
If all the numerators and the denominator are changed by opposite signs, the result is changed by: - 87% and + 435%					
If the numerators and the denominator are changed by the same sign, the result is changed by: - 67% and + 102%					

Table 3. 3 : Effect of extreme values on the result in 2050

2050	<i>BP</i>	is changed by	<i>+/- 43%</i>	then, the result is changed by	<i>+/- 43%</i>
	<i>SCs</i>		<i>+ 158%</i>		<i>+ 158%</i>
	<i>WBs</i>		<i>- 84%</i>		<i>- 84%</i>
	<i>WSp</i>		<i>+/- 33%</i>		<i>+/- 33%</i>
			<i>+ 24%</i>		<i>- 19%</i>
			<i>- 45%</i>		<i>+ 82%</i>
If the numerators and the denominator are changed by opposite signs, the result is changed by: - 95% and + 795%					
If the numerators and the denominator are changed by the same sign, the result is changed by: - 89% and + 296%					

Table 3. 3 shows that the share of structural cost in the construction cost (*SCs*) is the parameter that implies the most uncertainty on the results because of its high variability. It influences the result between - 84% and + 158% of its average scenario.

Figure 3. 8a shows the highest uncertainties. An increase of approximately + 795% of the average scenario in 2050 is depicted (up to 2,096,640 m³). This result is due to the maximum values of the numerators (*BP*, *SCs*, or *WBs*) and the minimum value of the denominator (*WSp*).

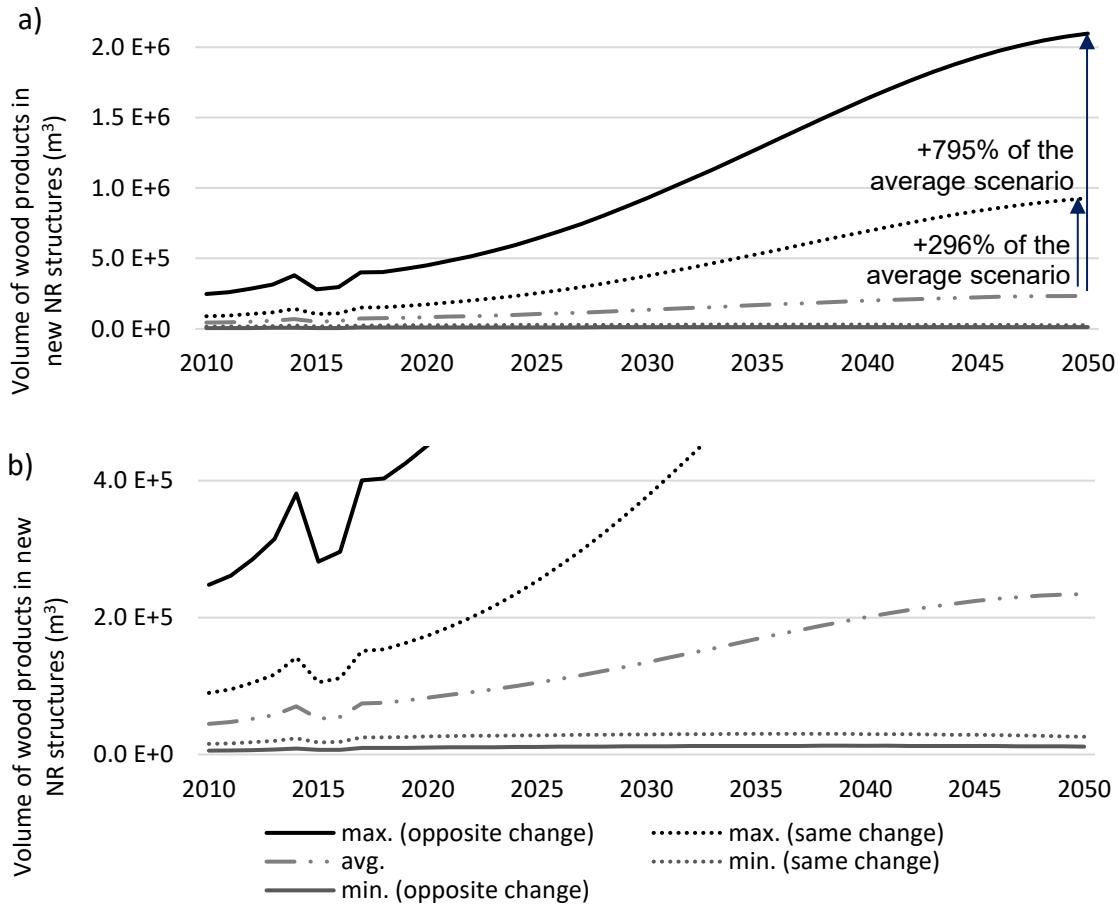


Figure 3.8 : Extreme scenario of wood (m³) in the structure of new NR buildings in Quebec (new buildings and structural additions) – according to the change of numerators and denominators compared to the average scenario: a) all curves and b) zoomed in for the average and minimum curves

For the projections, some parameters follow exploratory scenarios such as the *WBs* and the *BP*. They respectively follow the arbitrary scenarios and exploratory scenarios of the population [118]. The projection of these parameters was also performed according to their respective historical trend. This was to assess the sensitivity of the projection methods on the results. The sawmill yield follows its historical trend but, depending on the amount of included past data, the trend has different growth coefficients.

In supplementary information, projecting the trend of the *WBs* will result between the average and the minimum exploratory scenario (Figure A. 4 and Table A. 7). For the projection of the *BP*, the trend is between the maximum and the average scenario of the building permit (Figure A. 3 and Table A. 6). *WBs* and *BP* trends stay between the maximum and minimum projection. Concerning the projection of the sawmill processing yield, the trend is not the same when the

included data relate to the years from today to 2008 or to 1990. It will result in different volumes of roundwood to harvest between the starting and the ending date. The maximal difference is at 11% (around 2028 – Figure A. 6).

3.4.2 Upstream of the building sector

The figure below (Figure 3. 9) displays the historical availability of softwood in the forests of Quebec, the total harvesting [124], and the historical harvesting of softwood for lumber exports [125]. It also depicts the projections after 2017. The total harvesting considers the four sectors of the wood industry (pulp, paper, and cardboard; the sawmill industry; veneers, plywood, and panels; and finally, the cogeneration and energy products industries).

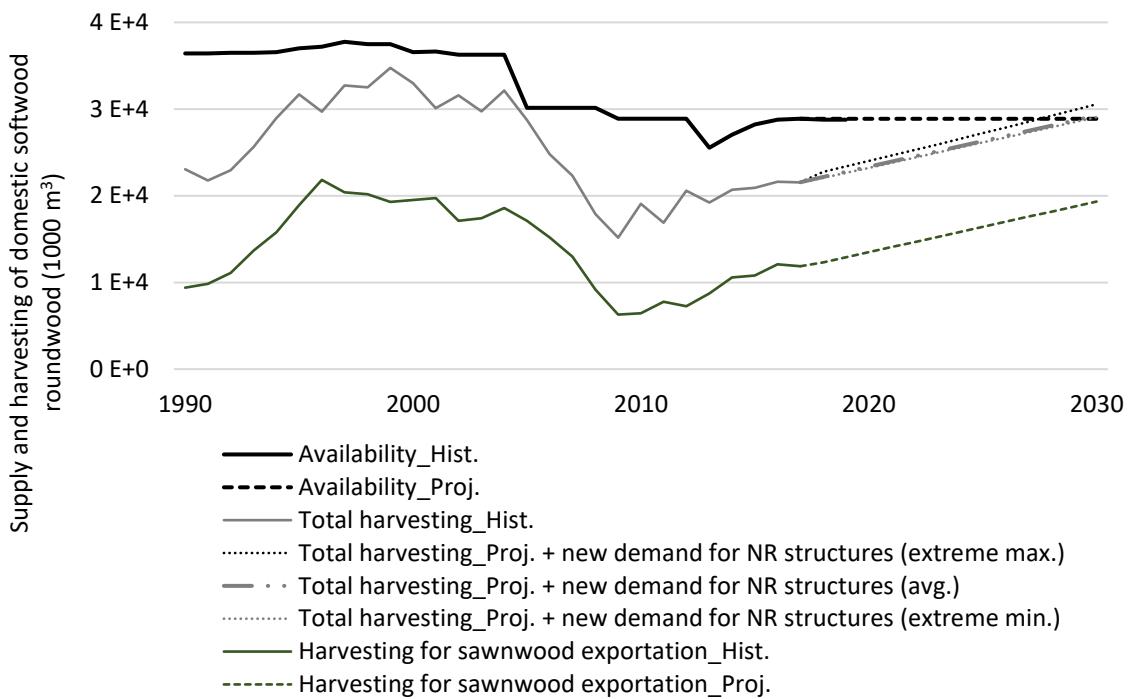


Figure 3. 9 : Total domestic softwood harvesting for NR building related to the availability and others projected end-uses; Historical values of total harvesting and availability from [124], and historical values of harvesting for sawnwood exportation converted from [125]

Regarding the other markets, the importance of the additional softwood roundwood harvesting for NR building structures does not override the total harvesting. The trend of the total harvesting remains more important than the estimations for new NR structures (estimations with the maximal range of the Figure 3. 8(a)). In 2030, even with high uncertainties in the estimation of wood in new NR building structures, its harvesting respectively accounts for 0.07%, 0.75%, and 4.95% of the total harvesting in the extreme minimum, average, and extreme maximum

scenarios (under the assumption that the other markets follow the trend of the exportation). The softwood lumber exports accounted for approximately 50% of the total harvesting in the last 10 years and mainly drives the past harvesting trends. It implies the harvesting for new NR structures may not be the main market branch that will contribute to reaching the limit before 2030 (for the time horizon of 2050). More disaggregation between the different wood products is necessary to understand if competition between them will occur to allow the growth of their respective market. This is important because the competition between products and sectors affects the resource availability and thus the environment and sustainability [81].

The sensitivity that was performed on the yield (Figure A. 5) influences the roundwood to harvest (Figure A. 6). This effect accounts for a maximal difference of 11% between the two harvesting curves for NR structures in 2028. Regarding the total harvesting, this difference is not remarkable (i.e., a difference of less than 0.05% of the total harvesting in 2028).

3.4.3 Discussion

The research aimed at investigating a methodology to account for the NR building material consumption. The presented method was applied to estimate the volume of wood in the structures of the new non-residential buildings. Then, projections of the estimation were suggested according to three scenarios (min., avg., and max). The importance of the estimation was also assessed comparatively to the total harvesting of all the wood sectors. The sensitivity analysis highlighted the parameters with the most influence on the results and with the highest ranges of uncertainty. In future works, system boundaries should be expended to understand the effects of wood products consumption on the other structural materials as well as the effects of the stock accumulation on future discarded material.

In the literature, to estimate the material consumption, dynamic material flow analyses mainly considered the material intensity per square meter and statistical data on the total floor area put in place (or the material intensity per capita and the population of the country). Therefore, the presented methodology to estimate the quantity of wood should be compared to other methods using those parameters (under the condition of available data).

Finally, this method can serve on one hand, for life cycle inventory to evaluate the environmental impact of a growing wood product use in the NR buildings. On another hand, it can also serve

to initiate a life cycle wood flow analysis. However, to improve the results, more research on the material composition of the non-residential building archetypes is necessary.

3.5 Conclusions

Regarding the estimation of wood for new NR building structures, the average scenario ($WBs_{2050} = 60\%$) suggested an increase of 159,513 m³ from 2017 to 2050. It is 3.1 times higher than the volume that was estimated for 2017 (74,801 m³). The maximum scenario is 4.2 times higher, and the minimum scenario is 2.1 times higher (Figure 3. 6). However, the uncertainties in the parameters showed higher values (2,096,640 m³ of wood in structures, approximately + 795% of the average scenario in 2050).

The results showed how and when the resource availability can be constrained depending on the assumption of the projections in the wood use markets. If all harvestings follow the export trend, the resource availability can be constrained before 2030, considering or not the harvesting for new NR building structures. Despite the high uncertainty in the amount of wood in NR building structures, the estimation has a small weight on the total harvesting. In 2030, it accounts for 0.07%, 0.75%, and 4.95% of the total harvesting in the extreme minimum, average, and extreme maximum scenarios (under the assumption that the other markets follow the trend of the exportation).

The main sources of uncertainty in the estimation of wood in the structures of new NR buildings are the interdependency between parameters of the model, in addition to used parameters to estimate the structure price. Regarding the softwood harvesting, one of the main sources of uncertainty concerns the evolution of the NR market in comparison to others markets that use the same resources (such as wood exportations, papers, etc.). This can be an issue as all markets contribute to reaching the limit.

CHAPITRE 4 : CONSEQUENCES ENVIRONNEMENTALES DE L'AUGMENTATION DE LA PRODUCTION DU BOIS POUR LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES

Avant-propos

Auteurs et affiliation.

Sylvain Cordier, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada - AND - NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

François Robichaud, Forest Economic Advisors, LLC, 298 Great Road, Littleton, MA 01460, USA

Pierre Blanchet, NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

Ben Amor, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada

Date d'acceptation : 7 novembre 2021

État de l'acceptation : Version finale publiée

Référence : Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2021. Regional environmental life cycle consequences of material substitutions: The case of increasing wood structures for non-residential buildings. Journal of Cleaner Production. 328 (2021) 129671. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129671>

Titre en français : Conséquences environnementales du cycle de vie des substitutions de matériaux à l'échelle régionale : Le cas de l'augmentation des structures en bois pour les bâtiments non résidentiels.

Contribution au document :

Ce chapitre présente l'établissement des flux de matériaux substitués sur lesquels repose le résultat des impacts environnementaux évités dans le cadre d'une ACV Conséquentielle. En premier lieu, une recherche d'études qui comparent des structures non résidentielles en bois à des structures principalement faites en acier et en béton a permis de collecter des informations pour établir des facteurs de substitutions. Dans un second temps, les facteurs de substitutions de l'acier et du béton sont combinés au flux de référence du bois de structure pour évaluer les impacts environnementaux déplacés par la production du bois de structure.

Les résultats démontrent, dans la phase de production, le rôle majeur de la variabilité des facteurs de substitution sur les impacts évités par rapport aux différents types de matériaux substitués. Les résultats montrent aussi que la substitution de l'acier, bien que sa quantité substituée soit inférieure à celle du béton, est plus avantageuse que celle du béton. Différentes analyses de sensibilité ont été réalisées pour connaître l'influence des paramètres principaux sur le résultat : (i) la sensibilité du résultat par rapport aux distances de transport du bois dans le cas où les récoltes totales de résineux au Québec atteindraient la limite de la forêt; (ii) la variabilité du résultat par rapport aux valeurs minimum et maximum facteurs de substitution et aux types de matériaux substitués; (iii) le choix d'un scénario de substitution combinée ou distincte de l'acier et du béton.

Résumé :

Plusieurs études ont montré les avantages sur le changement climatique de l'utilisation du bois dans le secteur de la construction, ce qui a reçu le soutien des décideurs. Cependant, peu d'études portent sur d'autres indicateurs environnementaux. Les impacts environnementaux (tels que la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources) des substitutions de matériaux, une conséquence de l'utilisation croissante du bois, font encore défaut dans la littérature. Les études qui comparent différents matériaux de structure se concentrent soit sur un seul bâtiment, soit sur un système structural qui serait représentatif à plus grande échelle. Cependant, les avantages environnementaux de certains projets ne sont pas facilement extrapolables à l'échelle d'une

région donnée avec une variété d'architectures. Les effets de plus grands ordres, au-delà de l'échelle du bâtiment, peuvent en effet impliquer des changements dans la disponibilité des ressources en fonction des fournisseurs et des ressources non contraintes. L'objectif de cet article est d'évaluer les conséquences environnementales du cycle de vie des substitutions par le bois à une échelle régionale pour le secteur de la construction non résidentielle. L'utilisation croissante des structures en bois pour les bâtiments non résidentiels dans la province de Québec (Canada) est utilisée comme étude de cas. La méthode comprend le développement de facteurs de substitution de matériaux en comparant plusieurs structures. Les facteurs de substitution montrent qu'en moyenne, le bois peut remplacer, simultanément, 0,59 et 4,54 fois sa masse d'acier et de béton, respectivement. Cependant, la substitution de l'acier présente plus d'avantages que celle du béton. Parmi les paramètres testés, la variabilité des facteurs de substitution des matériaux implique le plus d'incertitudes dans les résultats. L'originalité de notre étude réside dans les limites qui peuvent modifier les conclusions tirées de la substitution à grande échelle. Avec trois scénarios de substitution pour quatre catégories d'impact, les résultats ont montré un avantage à utiliser le bois dans sept des douze combinaisons. L'indicateur de qualité de l'écosystème est le plus défavorable et présente des tendances opposées à celles des indicateurs de changement climatique, de santé humaine et de ressources. En tenant compte des facteurs de substitution moyens des matériaux combinés à l'utilisation potentielle maximale du bois dans les structures non résidentielles (NR) au Québec en 2050, le bois peut contribuer à éviter 2,6 Mt de dioxydes de carbone équivalents (CO₂eq.). Cette quantité équivaut à 3,5 % de l'objectif de réduction des émissions de CO₂eq. du Québec en 2050 par rapport à 1990.

Abstract :

Several studies have shown the benefits of using timber in the construction sector in terms of climate change, which has received the support of decision-makers. However, few studies focus on other environmental indicators. The environmental impacts (i.e., such as human health, ecosystem quality, and resources) of material substitutions, consequence of the increasing use of wood, are still lacking in the literature. Studies that compare different structural materials focus either on a single building or on one structural system that would be representative on a larger scale. However, the environmental benefits of some projects are not easily extrapolated to the scale of a given region with a variety of architectures. Higher-order effects, beyond the

building scale, can indeed imply changes in the resource availability according to the unconstrained suppliers and resources. The objective of this paper is to assess the life cycle environmental consequences of wood substitutions at a regional scale for the non-residential construction sector. The increasing use of wood structures for non-residential buildings in the province of Quebec (Canada) is used as a case study. The method includes the development of material substitution factors by comparing several structures. The substitution factors show that, on average, wood can replace, simultaneously, 0.59 and 4.54 times the weight of steel and concrete, respectively. However, steel substitution has more advantages than concrete substitution. Among the tested parameters, the variability of the material substitution factors implies more uncertainties in the results. The originality of our study lies in the limitations that may change the conclusions drawn from the substitution at a large scale. With three substitution scenarios for four impact categories, the results showed an advantage of using wood in seven of the twelve combinations. The ecosystem quality indicator is the most unfavorable and shows opposite trends to climate change, human health, and resource indicators. Considering average material substitution factors combined with the maximum potential use of wood in non-residential (NR) structures in Quebec in 2050, wood can contribute to avoid 2.6 Mt of carbon dioxide equivalent (CO₂eq.). This amount is equivalent to 3.5% of Quebec's CO₂eq. emission reduction target by 2050 compared to 1990.

Keywords : Consequential life cycle assessment ; Building environment ; Material substitution ; Wooden structure.

Regional environmental life cycle consequences of material substitutions: The case of increasing wood structures for non-residential buildings.

4.1 Introduction

Wood has several properties that favor its use in construction, including the high strength-to-mass ratio, renewability of the resource, and low-carbon emission during manufacturing. The environmental impacts of wood building, compared to other materials, have been continuously studied using several individual buildings [16], [27], [126]. With the increased number of publications showing that the use of wood in construction may be an eco-friendly option, decision makers may move to use it on a large scale. However, the environmental benefits of some projects are not easy to extrapolate [57]. Moreover, making the decision for large-scale use of wood in construction can have environmental consequences that extend beyond the boundaries of the sector. A better understanding of the consequences, including material substitution, can therefore help in the decision-making process.

In the construction sector, greenhouse gases (GHGs) displacement by wood is increasingly studied in environmental assessments. The literature presents a variety of research on aggregated GHGs, CO₂, or carbon displacement factors by building archetypes, systems, or sub-products [17], [19]–[22]. The results suggest that the substitution is desirable to mitigate GHG emissions, of which some impact indicators are less addressed in the literature.

In addition to the narrow focus on GHG, these factors contain sources of uncertainties from life cycle assessments (LCA). Among those, the amount of material/product substitution varies according to the building architecture. Its variability is important as the estimated environmental impact depends on the required quantity of materials to fulfill the function of buildings. And hence non-considering this variability can decrease the robustness of the results. Therefore, before evaluating environmental impact displacements, it is necessary to study material substitution factors (in mass units) in terms of relative functional performance for a better result interpretation.

In the literature, there are two main types of material substitution modeling. On the one hand, some studies compared all the inventory of one building according to several construction scenarios [16], [18], [23], [24]. On one building scale, Hoxha *et al.* (2014) analyzed the following three parameters: service life, quantities, and elementary impact of the building materials. They showed that uncertainties in the material quantities do not influence the variability of the result [25]. However, due to variability in structural products and building archetypes, the material substitution can vary. Because the extent of the variation is difficult to extrapolate, it is not easy to generalize the material substitution of one building at a larger scale. On the other hand, other studies assumed a ratio for the material substitution modeling [28], [29]. For larger-scale assessments, researchers have used one building archetype or one structural system [28], [29]. Eriksson *et al.* (2012) highlighted the importance that the building designs have on wood demand and thereby on carbon emission reduction [30]. Hence, a study that looks at the potential impact displacements of wood structures with substitution factors reflecting the required quantities to fulfill the function (considering its maximal variability) at a regional scale seems necessary. In this study, the substitution aggregates of existing case studies of different building structures were evaluated.

The studies reviewed thus far compared the environmental burdens resulting from wood-based products and alternative material-based products. This approach is known as attributional LCA [9]. However, considering higher-order effects of progressive material substitution, out of the building sector boundaries, is less addressed in the building literature. These order effects may include changes in the supply of resources depending on limitations and constrained suppliers. The inclusion of this supply availability is more tackled in the consequential approach. This approach seeks to consider the market response to changes in demand, such as material substitution [9]. In the building sector, consequential LCAs on substitution exist [37]–[40]. The functional units refer to one single product. If linearity between the consequences of a small decision and the size of the change are assumed, then the precise size of the functional unit is less important [7]. However, for decisions involving the entire sector, the size should reflect the extent of the consequences [7]. Based on data availability and material stock and flow assessment, but neglecting the scale prevents from understanding the limits of available resources. Studies that also consider the potential impact displacements of wood structures based on resource availabilities and supplies (either for wood or alternative materials) are

missing. Nepal *et al.* (2016) studied the environmental benefits of increasing wood as a substitute for non-wood materials in non-residential (NR). However, the substitution modelling uses an estimate of average net reduction in manufacturing emissions when wood products displace non-wood products based on 21 attributional studies reviewed by Sathre and O'Connor (2010) that have varying system boundaries [36]. Eriksson *et al.* (2012) and Nepal *et al.* (2016) used a forest sector economic model to consider the wood supply market. However, information on the supply and constraints of alternative materials is still missing.

To date, the literature presents different methods to evaluate material substitution by using an attributional approach, only focusing on GHG emissions. Also, material substitution is merely modeled for one specific building or through one typical building structure. The large-scale substitution effect is therefore difficult to extrapolate from these studies. The environmental indicators and the wide variety of architectures that can change the outcome of the substitution are not captured either. These limitations motivated the design of this study. The originality of the proposed research lies on the development of a methodology that assesses the environmental consequences of a high market penetration of wood structures in the construction sector by using a regional resolution. To do so, the non-residential construction sector of the Quebec Province (Canada) is used as case study.

To achieve our objective, this paper has the following structure. The methodology section presents the goal and scope of the case study (section 4.2.1), development of the material substitution factor to consider the importance of building designs (section 4.2.2), modeling of the environmental impacts of the three materials (section 4.2.3), and the sensitivity analysis (section 4.2.4). The following sections describe the significance of the substitution (section 4.3.1), impact (sections 4.3.2 and 4.3.3), and sensitivity (section 4.3.4) results, and their limitations. Finally, section 4.4 interprets the results and relationships between the various findings in the conclusions.

4.2 Methodology

We first define the goal and scope of the case study, and then discuss the material substitution factor (sf) estimations (i.e., research and data processing), environmental impact modeling, and sensitivities. Impact modeling consists of the selection, within the ecoinvent database, of the

material production processes that can correspond to the studied region. Figure 4. 1 illustrates the overall developed methodology.

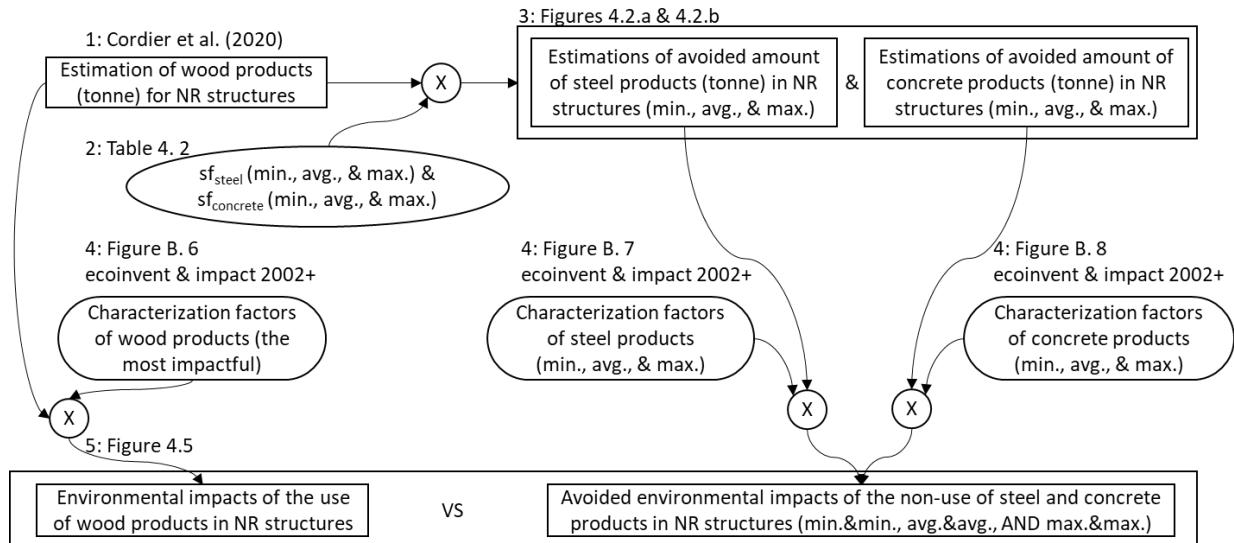


Figure 4. 1 : Graphical view of the calculation steps

4.2.1 Goal and scope

We focused on the governmental commitment defined in the Quebec wood charter. The objective of the charter is to enable the increased use of wood in construction of buildings of more than six floors. Therefore, the geographical boundaries include NR building structures in Quebec, while temporal boundaries concern the current use of wood up until 2050. Cordier *et al.* (2020) estimated the potential volume of wood structures. The maximum scenario is therefore chosen as the reference flow. This scenario considers the maximum variability of parameters, with 28%, 45%, and 80% of structures classified as "wood" in 2017, 2030, and 2050, respectively. Lastly, referring to ISO 14040:2006 (ISO 14040, 2006), the functional unit definition doesn't apply as this research doesn't focus on a comparative LCA or an analysis of a given product or a service. This research focuses exclusively on the assessment of the environmental consequences of an increased use of wood on the macroscale.

4.2.2 Material substitution estimation

To date, there is no database available on structural material substitutions. Therefore, studies that compare different structures for the same NR building helped to estimate the amount of wood required to replace a given amount of steel and concrete. We used peer-reviewed papers, using the keyword string ["substitution factor*" AND "building*"] in Scopus under the field

“ALL”. It resulted in a list of forty-one papers. Another research in the field of Title-abstract-keywords was ["displacement factor*" AND "building*" AND "wood"], which resulted in seven papers. The first sorting concerned the title and the abstract. Any paper that did not mention a comparison between building materials was removed. Other keywords were tested without any additional success. Finally, the selection focused on the papers with a detailed bill of materials on the structure; we also used the cited references of the sampled studies to find more information.

The non-residential case studies from the literature compared a concrete frame or a steel frame to its equivalent wood frame, and each frame included concrete, steel, and wood products. It is important to note that a steel frame suggests that steel is the most used material (same suggestion for a concrete frame and a wood frame). Moreover, from the alternative (concrete or steel) to the wood frames, wood products often substitute a portion of steel and concrete products. That is, the sf_{steel} and $sf_{concrete}$ can give an estimation of the combined substitution of steel and concrete masses for 1 tonne of wood product. Thus, it represents a consistent starting point to build the inventory of materials and assess the consequences of substitutions in NR buildings.

Equations 4. 1 and 4. 2 present the literature-based calculation of the material substitution factors sf_i . sf_i is a ratio of the mass unit. It presents the amount (tonne) of the structural material i (steel or concrete) that 1 tonne of wood-based products w would substitute for the same structural function.

$$sf_i = - \frac{t_{i,wf} - t_{i,jf}}{t_{w,wf} - t_{w,jf}} \quad (4. 1)$$

$$sf_i = - \frac{\Delta t_i}{\Delta t_w} \quad (4. 2)$$

jf denotes a frame mainly made of steel or concrete, wf a frame mainly made of wood-based products. Finally, t_i and t_w are the quantity (tonne) of the alternative material i (such as steel or concrete) and the wood-based products w . $t_{i,jf}$ is the quantity of the alternative material i that is in the alternative frame jf . Figure B. 1 details the procedure. Table 4. 1 presents the estimated material substitution factors sf_{steel} and $sf_{concrete}$.

Table 4. 1 : Material substitution factors in NR buildings

Based on data in	Function (# storey)	Wood products	Concrete products	Steel products	$s_{concrete}$	s_{steel}
Robertson <i>et al.</i> (2012)[18]	Typical mid-rise office (5)	CLT, glulam.	n.a.	No steel substitution.	5.78	0
Skullestad <i>et al.</i> (2016)[127]	Hotel (21)	CLT, glulam.	C25/30 & C35/45.	Rebar steel	5.63	0.32
Buchanan <i>et al.</i> (2013)[23]	Arts and media building (3)	Wood frame option 1 Wood frame option 2	LVL, other timber, plywood/MDF.	Conventional structural materials, pre-cast.	Reinforcing steel, sheet, and other structural steel.	5.26 0.74
John <i>et al.</i> (2009)[26]	Simplified office (6)	Wood frame option 1 Wood frame option 2	LVL, MDF, other timber, plywood, western red cedar.	17.5 and 40 MPa, pre-cast.	Reinforcing steel, sheet, wire, and other.	8.93 0.28 6.45 0.20
Scheuer <i>et al.</i> (2003) [128] & Smyth <i>et al.</i> (2017) [20]	Multi-use R/NR (6)		Lumber, particleboard, plywood.	n.a.	n.a.	10.85 1.39
Lessard <i>et al.</i> (2018)[24]	Office building (6)		n.a.	n.a.	n.a.	11.56 0.21
Dong <i>et al.</i> (2020)[129]	Stadium (n.a.)		Timber	Concrete, sand, and cement.	Steel	4.46 0.13
Pierobon <i>et al.</i> (2019)[27]	Office building (8)	Wood frame option 1 Wood frame option 2	CLT, glulam.	n.a.	Rebar steel	6.91 0.42 4.19 0.25
Milaj <i>et al.</i> (2017)[16]	Office building (2) Exercise facility (1.5) Sports center (2 + 2 mezzanines)		According to buildings: I-joist, plywood, wood stud wall, LVL, PSL, lumber, light frame wood truss, glulam, OSB.	Cast-in-place concrete, concrete masonry units.	Steel studs and open-web steel joists.	3.38 0.68 4.32 1.07 3.74 1.16
Buchanan <i>et al.</i> (2013)[23]	Arts and media building (3)	Wood frame option 1 Wood frame option 2	LVL, other timber plywood/MDF.	Conventional structural materials, pre-cast.	Reinforcing steel, sheet, and other structural steel.	0.22 0.71
John <i>et al.</i> (2009)[26]	Simplified office (6)	Wood frame option 1 Wood frame option 1	LVL, MDF, other timber, plywood, western red cedar.	17.5 and 40 MPa, pre-cast	Reinforcing steel, sheet, wire, and other.	2.17 0.80 1.57 0.57
Milaj <i>et al.</i> (2017)[16]	Medical building (1) Warehouse (1)		According to buildings: I-joist, plywood, wood stud wall, LVL, PSL, lumber, light frame wood truss, glulam, OSB.	No concrete substitution.	Steel studs and open-web steel joists.	0 0.79 0 0.68

n.a.: not available; R: Residential; NR: Non-residential; CLT: cross-laminated timber; Glulam: glued-laminated timber
 LVL: Laminated veneer lumber; PSL: parallel-strand lumber; MDF: medium-density fiberboard; OSB: oriented strand board

Table 4. 2 shows the minimum, the average, and the maximum value of sf_{steel} and $sf_{concrete}$ from Table 4. 1. The current paper assumes a combined substitution of steel and concrete with wood. For zero sf_{steel} or zero $sf_{concrete}$, the supplementary information presents a dedicated sensitivity analysis. Table 4. 2 presents the proportion of steel and concrete sensitive to the introduction of wood products. One tonne of wood replaces more concrete than steel. Also, the range of values for $sf_{concrete}$ is wider.

Table 4. 2 : Range of substitution factors (tonne of displaced steel / tonne of added wood product and tonne of displaced concrete / tonne of added wood product)

Wood (tonne)	$sf_{steel} (\Delta t_{steel} / \Delta t_{wood})$				$sf_{concrete} (\Delta t_{concrete} / \Delta t_{wood})$			
	min.	avg.	max.	std.	min.	avg.	max.	std.
1.00	0.13	0.59	1.39	0.39	0.22	4.54	11.56	3.29

It is worth noting that sf_i presents aggregate data for both the main structure and the envelope, which adds errors to the data. Further, for some case studies, it is not clear whether a data points refers to the main structure or the envelope [20], [23], [26], [128]. The supplementary information (Table B. 3, Table B. 4, and Table B. 5) provides further details and presents the sensitivity of sf_i with and without these uncertain data.

The potential substitution between materials is only functional. The study does not make predictions on the market response to the non-use of steel and concrete materials but considers the avoidance of these raw materials. Also, substitution factors are assumed to be constant over time. For the potential use of wood in non-residential buildings, the estimate follows the assumptions of Cordier *et al.* (2020).

4.2.3 Environmental impact modeling

In brief, for the environmental life cycle assessment, the ecoinvent 3.6 consequential database is used [130]. It is a consistent and complete life cycle inventory database. The selection of ecoinvent processes for steel, concrete, and wood products comply with most of the material grades applied in the Quebec context for non-residential buildings. The selection of the consequential approach for the background allows consistency with the consequential substitution of the foreground. The life cycle impact assessment method is IMPACT 2002+ V2.15 [131], using the computing software SimaPro 9.

Wood dataset

Two reasons implied the choice of cross-laminated timber (CLT) among the structural wood products. First, CLT is one of the structural products that allow the construction of high-rise buildings. Second, the CLT process allows for a conservative approach. Indeed, it is one of the most impactful products compared to other wood options in the ecoinvent database (see section B.1.2 in supplementary information B).

Regarding transportation, the distances are as follows: 140.5 km from the forest to the sawmill [132], 1118 km from the sawmill to the mass timber factories, and 1107 km from mass timber factories to the construction site [132]. The use of maximum values for possible distances in the region maintains a conservative approach. Moreover, the higher density values of the different transported woods were also used (wet roundwood 870 kg/m³ [133], dried sawnwood 460 kg/m³ [134], and structural wood products 548 kg/m³ [135]).

Steel dataset

The supply of steel follows two paths, the blast furnace and basic oxygen furnace (primary steel) route or electric arc furnace (secondary steel). Secondary steel is considered as a limited raw material because its production depends on the availability of other sources that are new scrap (via post-production of steel) and old scrap (via post-use of steel products). Moreover, steel scrap is fully utilized [46]. Also, steel production (secondary and primary) is increasing worldwide [136] and is assumed to increase due to population growth until 2050 [137]. This implies that a change in the steel demand will not affect the secondary steel production but the primary steel [46]. This assumption holds as long as all available secondary steel is used but cannot meet the total steel demand, which is assumed due to the lack of specific projections of both steel path demands. The different types of steel products used in the building industry are structural sections, reinforcing bars, and sheet products [138]. Sensitivity scenarios use different steel grades for these products. The average scenario includes the grade with the average environmental impact performances compared to other grades (section B.1.2 in supplementary information B). We assume crude steel belongs to a global market because Canada imports a major share between 50% and 80% of its production of crude steel. In this regard, one steel company contributes 50% of the Canadian finish steel production [139]. A sensitivity analysis for the effect of steel made in Canada is presented in the supplementary information B (section

B.1.2). Regarding the distances and means of transport of steel of the global market, these are drawn from the literature [140]. More information is available in the supplementary information B (section B.1.2).

Concrete dataset

We assume the concrete products belong to a local market [141]. The choice of ecoinvent concrete processes complies with the descriptions in the database [142]–[144] and the Canadian standard association [145]. The ecoinvent concrete processes already include the transportation of raw materials and concrete from the factory to the construction site. The concrete grades used in buildings are also subject to sensitivity scenarios. Section B.1.2 of the supplementary information B presents more information on the concrete grades. The average scenario includes the grade with the average environmental impact performances.

4.2.4 Sensitivity analysis

To assess the sensitivity of main parameters, minimum and maximum scenarios are applied by using minimum and maximum substitution factors (see Table 4. 2), and steel and concrete unit processes with very high and low environmental impact performances. Those extreme scenarios illustrate the scale of effects of the variabilities in substitution factors and material grades. Two other sensitivity analyses assess the effects of steel and wood location. Regarding a projection of the total softwood harvest, which follows the trend of Quebec's exports, it can reach the current sustainable limit of the forest around 2027 [146]. Thus, for the next years, the modelling of Quebec's harvest corresponds to that of 2027. Therefore, the harvest in another region should increase to compensate the growing demand. Being close to Quebec, with a lower harvest limit but of the same order of magnitude as Quebec [147], the province of Ontario is a good candidate with increasing demand. Moreover, with the capability to double its harvests [147], the government is developing a strategy to do so by 2030 [148]. Due to the lack of data, the transportation distances in Ontario are chosen as those in Quebec. For the sensitivity analysis, wood transportation distances are also tested, and section 4.3.4 presents the results.

Since Canadian crude steel imports vary between 50% and 80% of its production [139], the modeling for the sensitivity analysis includes steel exclusively made in Canada. Compared to the average scenario with steel from around the world, this modeling assumes the Canadian

energy mix and reduced transportation distances for steel ingots and products. Section B.1.2 of the supplementary information B presents the modeling for the Canadian steel.

4.3 Results and discussion

First, the results present the maximum estimation of wood consumption [146] and the resulting simultaneous substitution of steel and concrete. The figures show the associated environmental impacts. Finally, the sensitivity analyses challenge the assumptions and limitations to understand their effect on the environmental impact results.

4.3.1 Material substitution effects

Considering the average material substitution factors sf_{steel} and $sf_{concrete}$, Figure 4. 2 depicts how much steel and concrete can be avoided at the Quebec regional scale when an increase in wood use is introduced in new NR structures. The increase corresponds to the maximum scenario defined by Cordier *et al.* (2020). Their study assumed the wood use increases because the non-residential building stock grows and wood gains market share (from 28% to 80%) over steel and concrete [146].

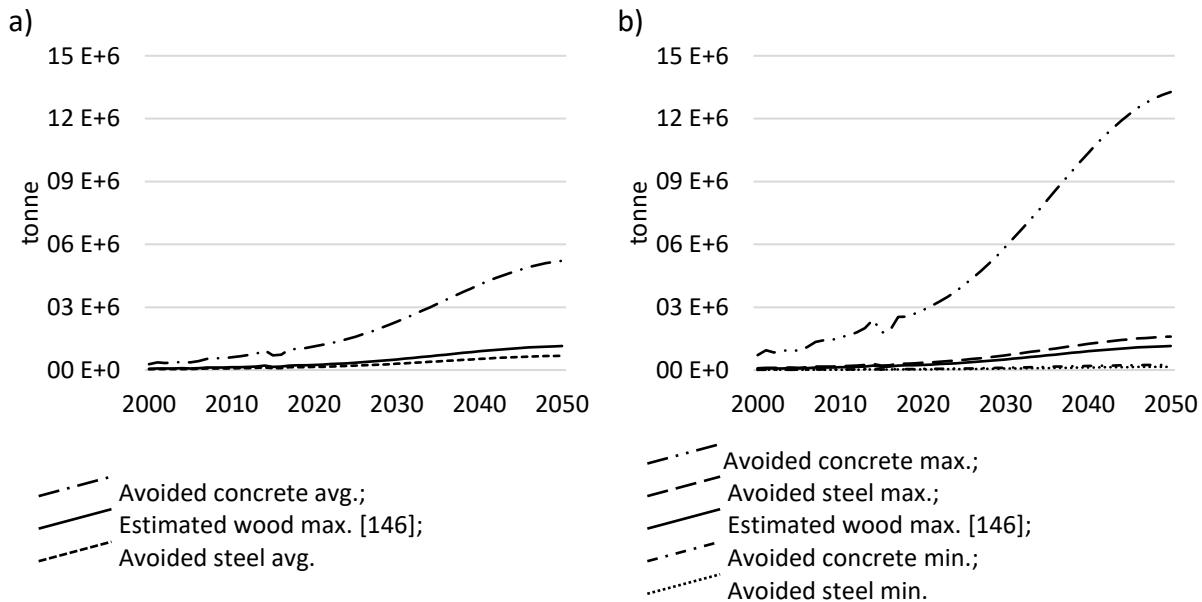


Figure 4. 2 : Potential masses (tonne) of steel and concrete avoided with the use of wood in new NR structures: a) average masses; b) minimum and maximum masses

For the average substitution scenario (Figure 4. 2(a)), the use of wooden structures (1 tonne) simultaneously avoids 0.59 tonnes of steel and 4.54 tonnes of concrete. For the maximum and minimum scenario, wooden products displace about 1.39 and 0.13 times their mass in steel and

11.56 and 0.22 times their mass in concrete, respectively (Figure 4. 2(b)). These two extreme scenarios delimit the maximum and minimum range of material substitutions. The values in Figure 4. 2 determine the environmental impact results as presented in sections 4.3.2, 4.3.3, and 4.3.4.

Certainly, technological improvements can make steel and concrete lighter, and hence make sf_{steel} and $sf_{concrete}$ timely dependent with a likely downward trend. The substitution factors refer to case studies from 2003 to 2020. However, data did not display a design trend, which suggests that the average substitution in the years 2030 and 2050 can be overestimated. It also implies the consideration of the minimum and maximum scenarios.

4.3.2 Climate change consequences

The following results (Figure 4. 3) present the climate change indicator in tonne of CO₂eq. with the average material substitution factors and modeling of average material impacts.

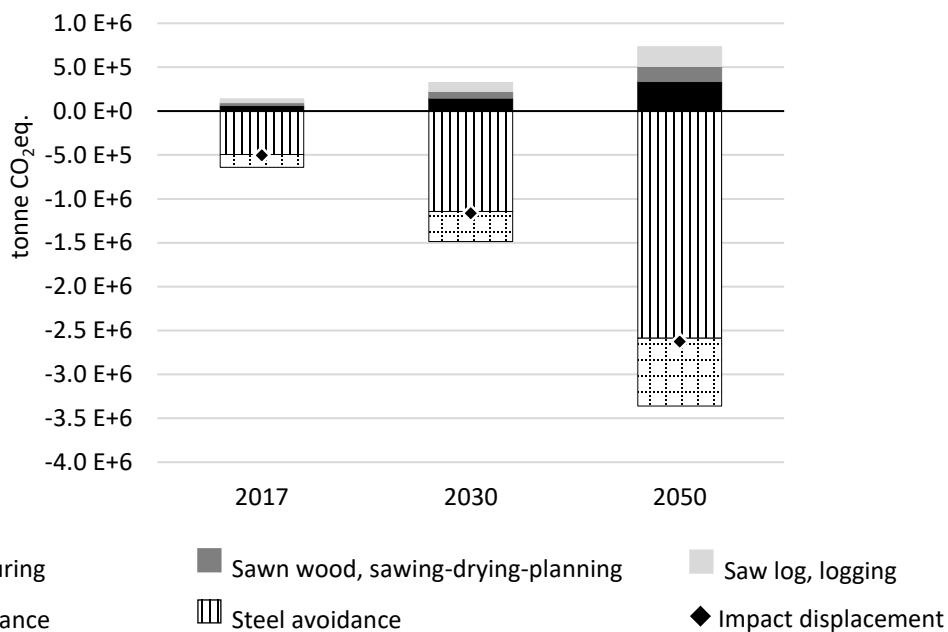


Figure 4. 3 : Climate change displacement in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood

Figure 4. 3 displays positive impacts for wood and negative impacts for steel and concrete. A positive result represents the environmental burden caused by using wood. A negative climate change represents the environmental avoided burden by not using steel and concrete. A negative

impact displacement (black dots) means that the use of wood is interesting from a GHG perspective.

Despite that wood substitutes a small quantity of steel ($sf_{steel} = 0.59$), parts of steel structures have a significant contribution to climate change. This is mainly related to the high carbon emissions during the production of primary steel (and only primary steel production is affected by the use of wood). As one of the assumptions was about the location of the steel manufacturing, a sensitivity analysis of Canadian-manufactured steel is presented in the supplementary information (see Table B. 23). Despite the modifications of the location, only a 3% change for the climate change indicator was observed in the overall balance. Hence, it does not change the conclusion.

Regardless of the environmental impact assessment method, the system boundary, assumptions, material substitution factor, allocation method, or building archetype, the cited literature demonstrates the advantage of using wood in material production stages. Based on these assumptions, the use of wood avoids 0.50, 1.16, and 2.62 Mt CO₂eq. in 2017, 2030, and 2050 (Figure 4. 3), respectively. The reduction targets of -14.8%, -37.5%, and -87.5% emissions in Quebec for 2017, 2030, and 2050 [149] respectively imply a reduction of -12.49, -31.76, and -74.11 Mt CO₂eq. compared to 1990 (Table B. 17 and Table B. 18). Thus, the avoidances are as much as 4.0%, 3.7%, and 3.5% of the reduction efforts. The comparison with political targets is important to interpret the orders of magnitude. It is worth noting that this reduction is not definitive since it only considers the consequences of manufacturing wood products for NR buildings. In addition, production technologies change over time, aiming for a significant decrease in the carbon intensity of steel and concrete. Therefore, the total reduction, including the entire life cycle of structural products and their potential reduction in carbon intensity, must be pursued for a complete assessment.

4.3.3 Environmental impact consequences

As previously discussed, most of the available literature focuses on GHGs. The next section shows the trend for three other aggregate impact categories with the average material substitution factors and processes of the ecoinvent database.

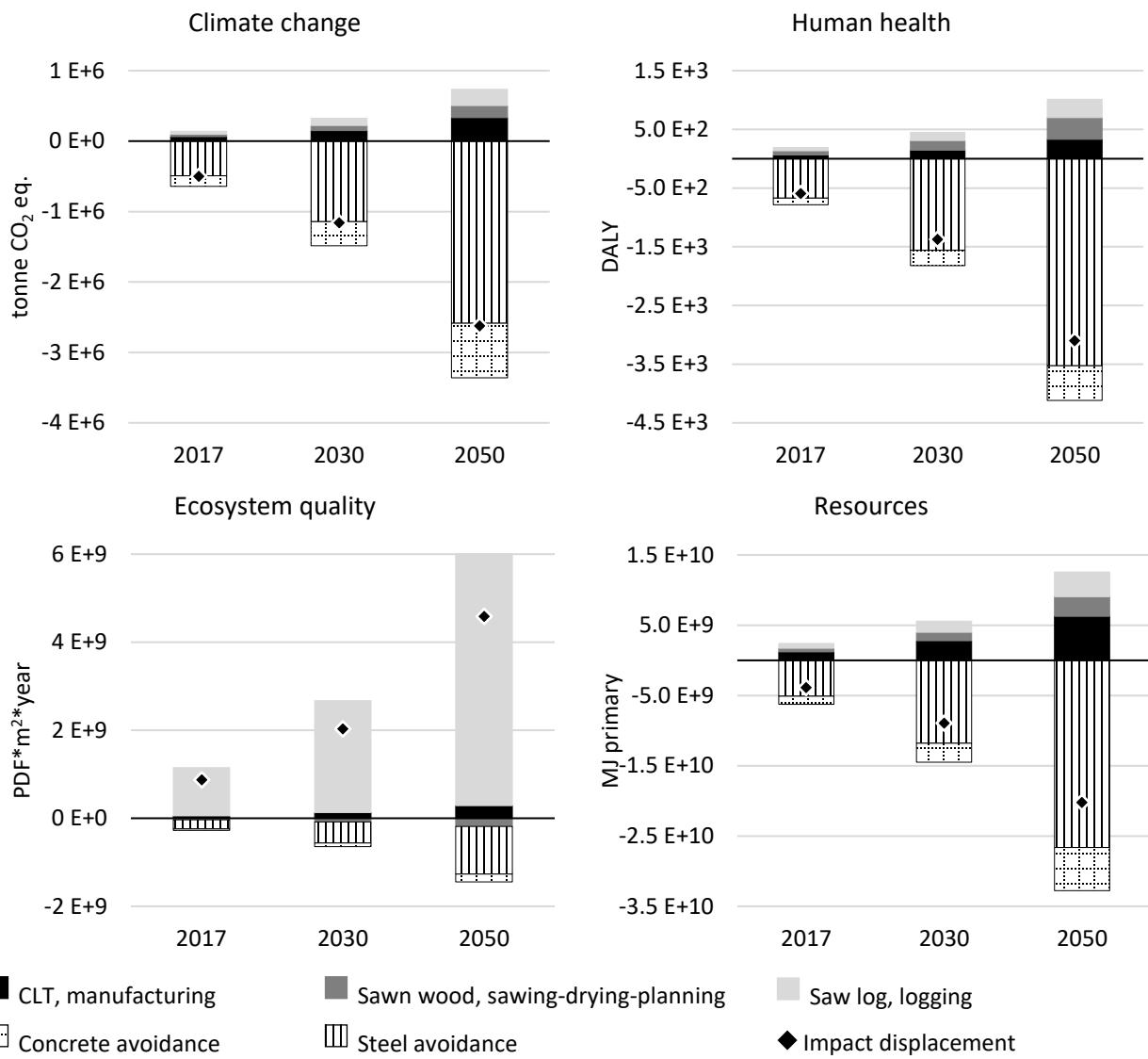


Figure 4.4 : Environmental impact displacement in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood

As observed for the climate change category, human health and resources indicators show that using wood products is more beneficial than using steel and concrete. For the ecosystem quality indicator, the advantage is for the non-wood structures (Figure 4.4). This is mainly related to the nature of the logging activity. Its land occupation contributes the most to the ecosystem quality indicator. This category makes substitution less obvious. It is important to note that IMPACT 2002+ only considers the land occupation area [131], [150] not the purpose of its use or its ability to restore.

From the results, sawing helps to avoid impacts on the quality of ecosystems. This is due to the co-products of sawing activities. In fact, these co-products supply the global wood market with

residues rather than shredding roundwood [151]. It is not the case for logging activities that do not consider the use of harvest residues, or their degradation on forest floor [152]. The supplementary information (Table B. 19) provides more details about the larger contributors to wood manufacturing.

In the literature, some studies have evaluated the environmental impacts where wooden structures are not the best solution, some of which are attributable to the use of machinery run on fossil-fuel [18], and lack of forest management [24]. These studies present some of the same major contributors as here (Table B. 19). For the third study, there is the smog formation due to an added gypsum fire resistance wallboard [27]. It illustrates the existing variability from one building to another and the difficulty to extrapolate material substitution at a regional scale. A limitation of this study is the exclusion of ancillary materials that are indirectly avoided or added by using structural wood. In a consequential LCA of 1 m² internal substructure walls, 10 cm of wood frame structure substitutes 10 cm of metal stud structure [41]. Although the avoided steel frame appears to be primary steel, the single score difference (with the ReCiPe v1.13 impact method) is not significant. Since using a single score can make the LCA results and conclusions highly dependent on the weighting factors, this may explain why the difference is not significant. Other large-scale and consequential models [30], [36] focus on climate change, which makes it more difficult to put other impact results into perspective.

Through an assessment of material substitution, our modeling has made it possible to evaluate not only the impact of displacement on climate change, but also on human health, ecosystem quality, and resources. Decision-making that responds to the climatic urgency must also pay attention to the ecosystem quality indicator. Using sensitivity analyses, the following section presents the importance of building design on impact displacements and how resource availability and supply can affect outcomes.

4.3.4 Sensitivity analysis

Figure 4. 5 shows the avoided impacts (negative) and additional impacts (positive) if wood was used for NR building structures instead of steel and concrete. For each impact, in addition to the average scenario (Figure 4. 4), the minimum and maximum scenarios present the highest impact displacement due to the variability of the sf_i and the steel and concrete grades.

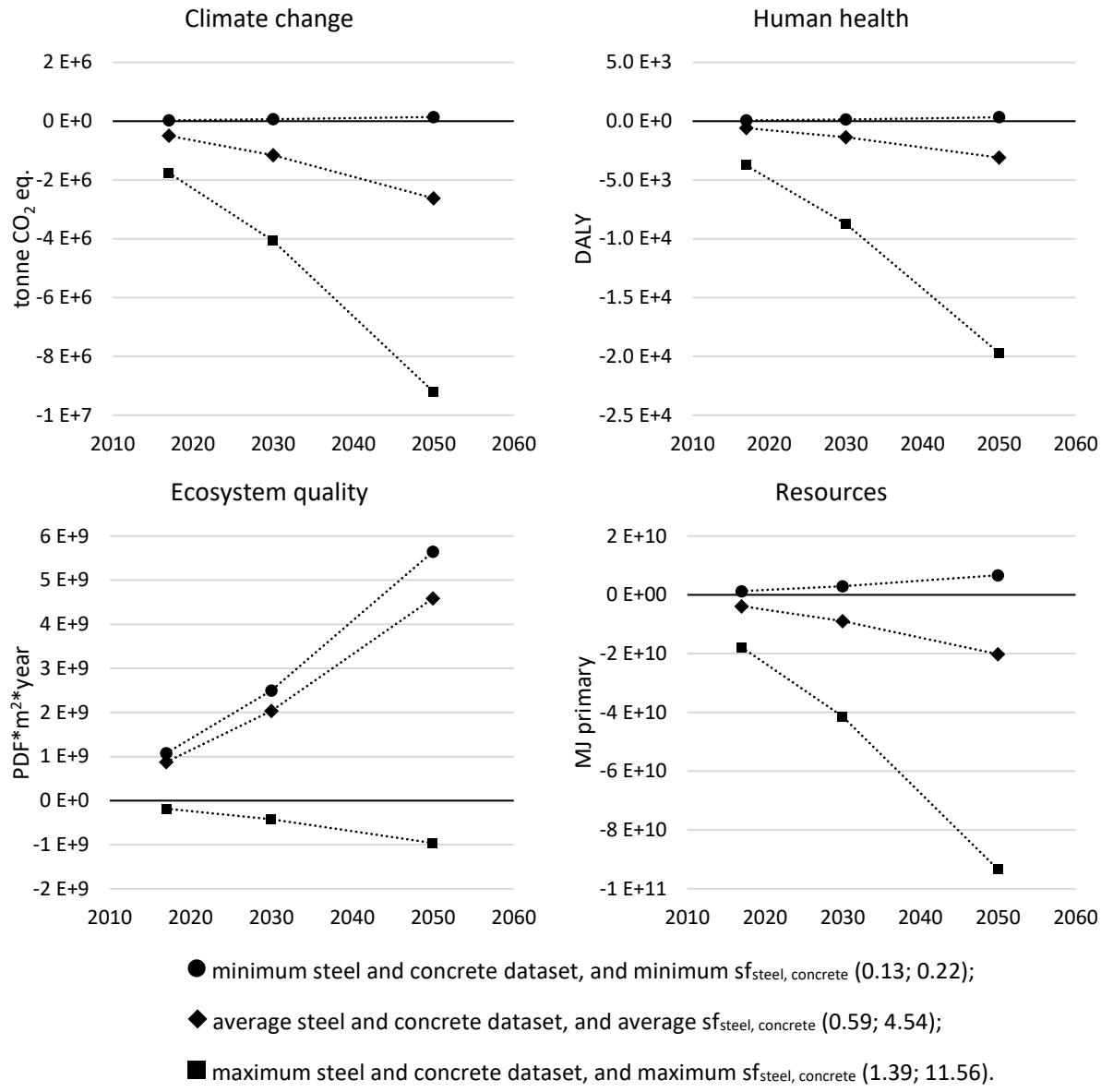


Figure 4. 5 : Potential range of impact displacements in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood

Figure 4. 5 does not show the same conclusions of Figure 4. 4 for each scenario. For the indicators of climate change, human health, and resources, the minimum scenarios present positive impacts compared to the average and maximum scenarios. Above the x-axis, the minimum scenario in the climate change indicator represents, in absolute value, 5% of the average scenario. Similarly, for the human health and the resource indicators, the minimum scenario represents 10% and 30% of their respective average scenario. For the ecosystem quality, it is the maximum scenario that shows a negative impact, contrary to the minimum and average scenarios. Below the x-axis, the maximum scenario represents, in absolute value, 21%

of the average scenario. The variability in the substitution factors and the material dataset change the conclusion of the substitution. The supplementary information (Table B. 20) shows that variability of the sf_i has the most weight on the results compared to the material impacts datasets. However, a such combined $sf_{steel; concrete}$ (0.13; 0.22) seems to be very conservative since it does not exist in the case studies (Table 4. 1).

The main assumption is a combined substitution of steel and concrete with wood. Some case studies show a substitution of steel or concrete only (Table 4. 1). The analysis of both cases is in the supplementary information B (section B.2.4). The steel and concrete grades used in the analysis are those with the least environmental impacts. For these two cases, the results are between the minimum and the average scenario of Figure 4. 5 (Figure B. 10 in the supplementary information B). The results shown in Figure 4. 5 do not change, but it demonstrates the steel substitution has greater advantage than concrete substitution. More work is necessary to determine the distribution of substitution according to the architecture.

Due to the potential lack of local roundwood by 2030, a sensitivity analysis compares the scenario of manufacturing structural wood products in Quebec only to a scenario of partitioned manufacturing in Quebec and Ontario. The additional information shows that there is a difference of less than 0.2% between the two scenarios (Table B. 21 in the supplementary information).

For an insufficient local wood supply, the transport distance of the resource must be higher. Thus, this may raise the following question: what transport distances of the saw logs change the conclusions of Figure 4. 5? Table 4. 3 shows that less than 1,947 km allows the average scenario to avoid the climate change, human health, and resources impacts. Beyond that, the conclusions (Figure 4. 5) of the average scenario change. Similarly, below 1,915 km, the maximum scenario avoids the four impacts. Cells without values correspond to the scenarios that do not avoid impacts. To save impacts, the transport distance of the saw logs must be negative. It is not realistic.

Table 4. 3 : Minimum transport distance (km) of saw logs which implies impact

Scenario	Climate change	Human health	Ecosystem quality	Resources
min.				
avg.	> 3,953	> 5,556		> 1,947
max.	> 13,526	> 34,569	> 1,915	> 8,500

Considering that it takes approximately 7,200 km to cross Canada, the greater distances clearly make no sense. For distances between 1,915 km and 7,200 km, some scenarios change. It would correspond to sawmills in eastern Quebec importing logs from Ontario and further away. But regardless of the impact indicator, the closer the scenario is to the x-axis, the more the transport distance of wood products will affect the result (supplementary information, Table B. 22).

As observed for climate change (with sf_{steel} lower than $sf_{concrete}$), steel substitution is more beneficial than concrete in all four categories. Despite the modeling changes of the steel dataset, the conclusions drawn from Figure 4. 5 are unchanged (Table B. 23). The impact assessment of this study only considers the supply chain of the three main materials. As these can be recycled and avoid the extraction of new raw materials, the consideration of end-of-life scenarios will complement the assessment of material substitution. The impacts of the use phase (i.e., energy consumption) also depend on maintenance and repair. At the scale of a building, this can present differences considering the thermal mass of the steel, concrete, and wood.

4.4 Conclusion

With the increased number of publications showing that using wood in buildings can be an eco-friendly option, decision-makers may move to its use on a large scale. In the context of increasing timber use in buildings, the main objective of this work is to assess the environmental consequences of wood substitution on a regional scale for the non-residential construction sector. The Province of Quebec (Canada) served as case study. Before the impact analyses, the estimation of material substitution was necessary. By comparing various structures, the average material substitution factors show that wood can replace concrete and steel of approximately up to 4.54 times and 0.59 times its mass. Considering the high variability of the data, the material substitution can be improved with more representative results on a large scale.

From the average scenario, the sensitivity analyses showed that the maximum variability of the substitution factors influences the results more than the uncertainties on the resource supply, or

the maximum variability of the material grades. According to the modeling, the alternative wood supply scenario implies a sensitivity of the results below 0.2%. For steel supply, it is less than 10%. Then, the maximum variability of the material grades implies a higher sensitivity, but lower than that of the substitution factors. The maximum variability of both sf_i and material grades changes the sign of the four impact displacements. Finally, the results showed an advantage for large-scale manufacturing of wood structures in seven of twelve combinations of three substitution scenarios and four impact indicators. As indicated in the literature, climate change is the main indicator of material substitution assessments. The results showed similar trends for the resource and human health indicators, but not for the ecosystem quality indicator.

Through an assessment of material substitution, this modeling was able to evaluate not only the impact displacement on climate change but also on human health, ecosystem quality, and resources. Adequate strategies and policies that respond to the current climatic urgency should also pay attention to the quality of ecosystems. The model presents the extent of impacts displacement considering the variability in building design and material grades. Moreover, its regional scale and consistent approach imply consideration of resource availability and supply (either it is for wood or alternative materials). For future work, the sequestration of atmospheric carbon, concrete carbonation, and end-of-life of building materials can determine their contributions to environmental impacts on a large scale. Increasing the carbon sink in the built environment can significantly decrease GHG emissions in the short-term without underestimating its long-term contribution.

CHAPITRE 5 : ACV DYNAMIQUE D'UNE UTILISATION ACCRUE DU BOIS DANS LES STRUCTURES NON RESIDENTIELLES ET DE SES CONSEQUENCES : INTEGRATION DE LA SEQUESTRATION DU CARBONE ET DE LA SUBSTITUTION

Avant-propos

Auteurs et affiliation.

Sylvain Cordier, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada - AND - NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

François Robichaud, Forest Economic Advisors, LLC, 298 Great Road, Littleton, MA 01460, USA

Pierre Blanchet, NSERC Industrial Chair on Eco-Responsible Wood Construction (CIRCERB), Department of Wood and Forest Sciences, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6, Canada

Ben Amor, Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign (LIRIDE), Department of Civil and Building Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada

Date d'acceptation : 9 octobre 2022

État de l'acceptation : Version finale publiée

Référence : Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, Amor B. 2022. Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material

substitutions. Building and Environment. Volume 226, December 2022, 109695.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109695>

Titre en français : ACV dynamique d'une utilisation croissante du bois dans les bâtiments et de ses conséquences : Intégration de la séquestration du CO₂ et des substitutions de matériaux.

Contribution au document :

Ce chapitre présente les scénarios de fin de vie du bois de construction pour compléter son cycle de vie. Il présente aussi l'évaluation dynamique de l'impact sur le changement climatique de l'inventaire dynamique conséquentiel de l'augmentation de l'utilisation du bois. En premier lieu, l'inventaire dynamique des flux élémentaires est établi pour le stockage temporaire et la fin de vie. Dans un second temps, l'impact dynamique est évalué selon deux indicateurs absolus (le forçage radiatif instantané et cumulé) et un indicateur relatif (la tonne CO₂eq.). Enfin, l'indicateur dynamique relatif est comparé à l'indicateur statique relatif.

Les résultats montrent que la substitution de matériaux contribue le plus à l'impact et que la séquestration du CO₂ après récolte est, temporairement, le deuxième facteur le plus important. Il y a donc un avantage à utiliser le bois dans cinq des six scénarios. Les résultats montrent aussi l'importance de modéliser l'inventaire de façon dynamique lorsque les flux élémentaires sont répartis dans le temps. Les évaluations statiques et dynamiques d'un inventaire dynamique avec des flux positifs et négatifs peuvent conduire à des conclusions opposées.

Résumé :

Les produits en bois peuvent avoir un impact plus faible sur le changement climatique (CC) que d'autres matériaux de construction, et leur teneur en carbone peut faire des bâtiments un puits de carbone temporaire. Cependant, l'utilisation à grande échelle de produits en bois dans les bâtiments nécessite une meilleure compréhension de ses conséquences pour soutenir les politiques de lutte contre le CC. L'inventaire conséquentiel du cycle de vie de ces produits contient des flux élémentaires dont les valeurs sont parfois positives, parfois négatives. Par conséquent, leur évaluation statique ne montre pas l'influence de l'absorption et de la libération de carbone, ni pendant ni après la limite temporelle du système. L'originalité réside dans la combinaison de la modélisation dynamique de la récolte et de la croissance des arbres, du stockage temporaire du carbone, des stratégies de fin de vie, de la substitution des matériaux, et des facteurs de caractérisation dans une ACV conséquentielle. Cette combinaison met en

évidence à quel point la substitution, les stratégies de fin de vie, et la séquestration peuvent être déterminantes. En outre, elle aborde les mesures statiques et dynamiques du forçage radiatif ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) et de l'équivalent CO₂. Dans l'étude de cas, la substitution de matériaux contribue le plus aux résultats. Ensuite, la séquestration du CO₂ après récolte est, temporairement, le deuxième facteur le plus important. Concernant les indicateurs, l'ACV statique surestime l'impact cumulatif à long terme sur le CC (tonne CO₂ équivalent) sans fournir d'informations sur l'impact à court terme de l'étude de cas. De même, l'évaluation d'un tel inventaire dynamique conséquentiel du cycle de vie avec une métrique dynamique donne des informations plus spécifiques quelle que soit la limite temporelle. Cependant, la métrique dynamique absolue ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) devrait soutenir la métrique dynamique relative (tonne CO_{2eq.}1^{ère} année) pour éviter des conclusions trompeuses.

Abstract :

Wood products can have a lower impact on climate change (CC) than other building materials, and their carbon content can transform buildings into temporary carbon sinks. However, the large-scale use of wood products in buildings requires a better understanding of their consequences to support CC policies. The consequential life cycle inventory of such products contains elementary flows with values sometimes greater sometimes less than zero. Therefore, their static assessment did not show the influence of carbon uptake and release, either during or after the temporal boundary of the system. The originality lies in the combination of the dynamic modeling of tree harvesting and growth, temporary carbon storage, end-of-life (EOL) strategies, material substitution, and characterization factors in a consequential life cycle assessment (LCA). This combination highlights the extent to which material substitution, EOL strategies, and carbon sequestration can be decisive. In addition, it addresses the static and dynamic measurements of radiative forcing ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) and the carbon dioxide (CO₂) equivalent (CO_{2eq.}). In this case study, material substitution contributed the most to result, followed by post-harvest CO₂ sequestration. In terms of metrics, the conventional static LCA overestimates the long-term cumulative impact on CC (tonne CO_{2eq.}) without providing information on the short-term impact of the case study. In addition, the assessment of such a dynamic consequential life cycle inventory (LCI) with a dynamic metric provides more specific information, regardless of the temporal boundary. However, the absolute dynamic metrics ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) should support the relative dynamic metric (tonne CO_{2eq.}1st year) to avoid misleading conclusions.

Keywords : Dynamic climate change assessment, Consequential life cycle assessment, Building environment, Material substitution, Wooden structure, Carbon stock.

Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material substitutions.

5.1 Introduction

The growing interest in wood construction for climate change (CC) impact mitigation derives mainly from two reasons: the manufacture of long-life wood products is conducive to a lower CC impact than other building materials [18], [27] and the carbon content of wood can transform buildings into carbon sinks [28], [153]. In the province of Québec (Canada) various measures have been announced to encourage the use of wood in buildings [154]. Following this announcement, questions have arisen regarding the consequences of the increased use of wooden structures for CC.

Temporary carbon sequestration assessment with static characterization factors, i.e., global warming potential over 20, 100, and 500 years (GWP20, 100, and 500, respectively), leads to biogenic carbon neutrality because of two conditions. First, it is assumed that the biogenic carbon dioxide (CO₂) sequestered during tree growth will return to the atmosphere at the wood-based product's end-of-life (EOL). Second, static characterization factors consider the potential impact of each greenhouse gas (GHG) at a fixed time horizon (20, 100, or 500 years), regardless of the temporal distribution of the life cycle inventory (LCI). Therefore, the influence of carbon uptake and release either during or after the assessment period is not considered. In their review, Røyne *et al.* (2016) showed that only 3% of studies accounted for the timing of GHG emissions and carbon sequestration [63].

However, several studies have improved their temporal assessments through dynamic modeling of the LCI and CC characterization factors. Levasseur *et al.* (2010) presented a computational method without a fixed time horizon [65]. Similar to static characterization factors, it uses the radiative forcing of GHGs according to the Bern 2.5CC model for CO₂ [66] and a specific impulse response function from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for non-CO₂ GHGs [67]. Cherubini *et al.* (2011) combined a biomass growth model with the Bern 2.5CC model. While the first models carbon uptake by trees related to wood products, the latter simulates carbon removal by the ocean and terrestrial biosphere [70]. In addition, the biomass

growth model has two key parameters: timing of carbon uptake and duration of biomass growth. Other researchers, such as Kirschbaum (2014) [68] and Tiruta-Barna (2021) [69], have investigated dynamic CC approaches based on temperature change metrics. These metrics go further down the chain of causes and effects of CC than radiative forcing.

Carbon uptake can occur before or after wood harvest [59], [60], [71], [72]. The latter applies if sustainable forest management ensures that new trees are planted after harvest. However, modeling carbon uptake after harvest leads to higher impacts than those modeled previously. Because it yields more conservative results, studies should prioritize the after-scenario if forest management is unknown.

Temporary carbon storage does not always result in CC benefits [76] as the benefit disappears on an infinite-time basis [78]. If a benefit exists, it depends on EOL scenarios such as landfilling, where permanent storage may occur [72], but also on material substitutions that were missing in previous works. According to Head *et al.* (2020), wood products generally benefit from CC, which may encourage the increased use of wood and lead to increased pressure on provincial forestry departments to increase annual allowable cuts [50]. Therefore, the authors claimed that CC benefits should be assessed from a consequential perspective.

In addition, some authors have focused on the CC substitution effects of long-life wood products [17], [19], [20], [47]. They developed GHGs, carbon, or CO₂eq. substitution factors. However, these factors depend on temporality, system boundaries, EOL scenarios, forest dynamics, and inclusion of biogenic carbon. Furthermore, the models assumed static substitution with steady carbon intensity for energy systems and industries [48]. Few studies on material substitution by wood products explicitly mention the use of dynamic inventories. Brunet-Navarro *et al.* (2021) discussed the expiration date of material substitution with wood products caused by the decarbonization of the energy mix and EOL recovery rate [55]. Kalt *et al.* (2016) [155] focused on the use of wood residues as substitute materials or fuels. They compared GHG savings using the IPCC default approach to a chi-square decay distribution [156]. Other authors multiplied static substitution factors using a time-dependent coefficient [56]. In addition to dynamic inventory, a few authors have included dynamic metrics. Peñaloza *et al.* (2018) used the GWP100 and the dynamic approach of Levasseur *et al.* (2010). The results were sensitive to the CC impact metric [54].

These methodological advances have highlighted the trade-off between increasing forest carbon sinks and promoting wood substitution [157]. The modeling of Schulte *et al.* (2022) suggested that decreasing harvest levels and prolonging rotations would increase net climate benefits compared to present Swedish forestry practices. This aligns with other findings [158]–[160] but some models show that using wood for substitution is advantageous [161], [162].

Finally, in reviews on carbon sequestration, storage in the built environment, and substitution [47], [48], it is not clear whether the approach used for analysis was attributional or consequential. In a 2021 meta-analysis of embodied GHG emissions from wood buildings, 17% of the studies were consequential or dynamic [49]. Recent studies have combined dynamic modeling and included temporary carbon storage in wood products [50] or buildings [51], [52]. However, a consequential perspective on material substitution is missing, although it would improve the understanding of market dynamics and supply scenarios when increasing the use of wood in buildings [49] but also the effect of materials released from demolished large-scale wood-based buildings.

Because of potential material substitution, carbon storage in long-lived, slow-growing wood products, EOL opportunities, and potential increase in the use of wood in buildings, a study that discusses the GHGs mitigation benefits of adopting a structural wood system at a regional scale is needed. The aim of the present study was to integrate the dynamic assessment of GHGs into the consequential LCA of the increased use of such wood products. The originality lies in the combination of the dynamic model of tree harvesting and growth, temporary carbon storage, EOL strategies, material substitution, and characterization factors in a consequential LCA of increasing wood use. This combination highlights the decisive role of substitution, EOL strategies, and sequestration. Furthermore, at the scale of a cohort of buildings, the carbon storage in the cohort is temporal over the lifetime of the cohort. However, at the scale of successive cohorts, carbon storage should be more sustainable over the lifetime of the cohorts.

5.2 Methodology

The methodology used in the present study is illustrated in Figure 5. 1.

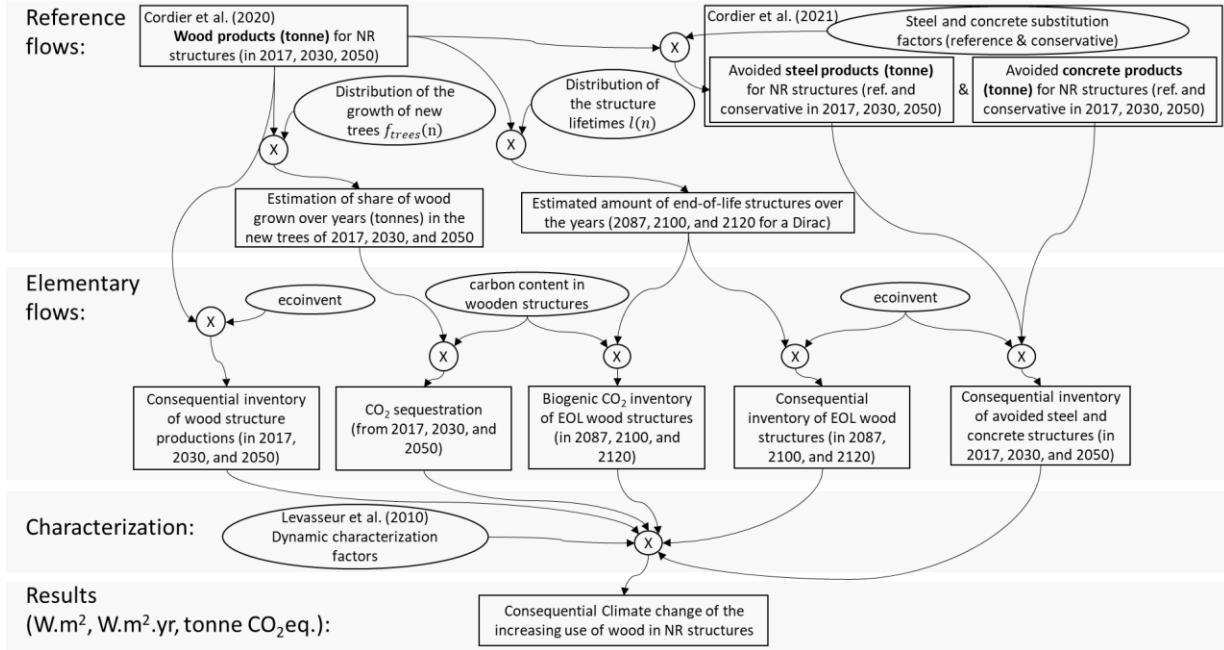


Figure 5. 1 : Schematic representation of the methodology used in the present study

5.2.1 Reference flows

Production

This case study focuses on the increasing use of wood in non-residential building structures in Québec, Canada. This includes the production phase of wood structures in 2017, 2030, and 2050 as well as the corresponding potential EOL phases, 70 years later. Wood production was approximately 4 E5, 9.27 E5, and 2.09 E6 m³ in 2017, 2030, and 2050, respectively, for 28%, 45%, and 80% of the new structures, respectively [146]. The density of the wood product ($\rho_{wood\ products}$) was 548 kg/m³ [135]. Thus, 1 kg of structural timber simultaneously displaced 0.59 kg of low-alloyed structural steel and 4.54 kg of concrete (35 MPa) in the reference scenario (ref); however, in the conservative scenario (cons) 0.13 kg of unalloyed structural steel and 0.22 kg of concrete (25 MPa) were displaced by structural timber, indicating there is no advantage to wood supply over steel and concrete supply [163]. Nevertheless, cross-laminated timber (CLT) structures allow for the construction of high-rise buildings and CLT is the timber product with the highest CC impact in the ecoinvent 3.6 database [130], [163].

End-of-life

Currently, particleboard (PB) production uses EOL wood as the raw material. It is used as an energy source in the biomass boilers of paper mills and as an alternative fuel in cement plants

[164]. However, these industries do not exclusively use it. This type of recycled wood represents 13% of the wood resources of cogeneration and energy plants, and together with sawdust, shavings, and other wood residues it represents 40% of the wood resources of panel plants (Table C. 1 and Table C. 2 in supplementary information C) [165]–[167].

After recycling, EOL material can be fully utilized, reducing the corresponding demand for reference (non-recycled) material. Thus, recycling activity is the marginal treatment of EOL materials [168]. As virgin woods are not the main inputs for the energy and cogeneration [167] or panel [167], [169], [170] industries, we assumed that their use in both industries is constrained for the following reasons. The virgin roundwood that supplies the panel and energy industries may be non-conforming wood for sawmills [171]. Unlike demolished and shredded wood, virgin materials are of better quality because they do not contain any contaminants. In addition, sawmill coproducts (constraint by-products) have better quality than post-consumer wood products, and they belong to the main inputs of the cogeneration and panel industries [165]–[167], competing with post-consumer wood products. Therefore, the full utilization of EOL wood has been uncertain in the past 70 years.

If not fully utilized, the recyclable materials will likely go to final disposal as marginal treatment. If an activity uses a material that is not fully utilized, it can avoid final disposal [172]. As the Québec government is working on banning wood from landfills [173], wood recycling activities will not be assigned credits for the avoided landfill. Therefore, EOL wood is expected to be stocked or recycled (without credit) to meet an additional demand.

In the present study, EOL modeling included three scenarios. The first was cogeneration. The incineration of EOL wooden structures allows for heat recovery. Although not replacing other heat sources, some of this heat generates electricity that may substitute wind power. Therefore, electricity from cogeneration avoids the life cycle impacts of wind turbines that produce the same amount of electricity. To guarantee electrical supply, biomass cogeneration plants also incorporate backup boilers of equivalent capacity running on heavy fuel oil or natural gas [164], [174]. Therefore, the second scenario assumed that cogeneration using EOL wooden structures avoided natural gas cogeneration. Supplementary information C provides more details on the industries' inputs and products substituted by the EOL structures. Finally, the third scenario

considered recycling PB. The use of recycled wood does not preclude the use of alternative materials.

The year of availability of an EOL structure depends on the year of construction and its life span. $l(t)$ models the lifetime distribution function of the structure. In the present study, the lifetime distribution was estimated using a Dirac function (5. 1). It provided the share of the EOL structure of the n^{th} year after construction.

$$l(n) = \begin{cases} 1 & \text{for } n = \text{lifetime} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5. 1)$$

Equation 5. 2 presents the instantaneous quantity of EOL structures in year yk' , built in year yk , with $0 \leq yk \leq yk'$.

$$V_{EOL \text{ of wood products } yk}(yk') = V_{\text{production of wood products } yk}(yk) * l(yk' - yk) \quad (5. 2)$$

Equation 5. 3 presents the instantaneous quantity of EOL structures in year yk' , built in the years yk .

$$\begin{aligned} V_{EOL \text{ of wood products}}(yk') &= \sum_{yk=0}^{yk'} V_{EOL \text{ of wood products } yk}(yk') \\ &= \sum_{yk=0}^{yk'} V_{\text{production of wood products } yk}(yk) * l(yk' - yk) \end{aligned} \quad (5. 3)$$

5.2.2 Elementary flows

The ecoinvent 3.6 consequential database [130] provides non-biogenic GHGs flows (Figure 5. 1). For biogenic carbon flows, the model considered only those directly related to wood structures. The following sections present the modeling of biogenic carbon uptake and release.

Biogenic carbon uptake at the production

Attributing carbon sequestration to the period before or after harvesting and timber production affects the results [59], [60], [71], [72]. As the after-scenario results in higher radiative forcing than the before-scenario, biogenic carbon uptake was assumed to occur after harvest. This method attributes biogenic carbon uptake to the regrowth of the forest and not to the carbon stored in the structures. The first derivative of the Chapman-Richards growth function $f_{CR}(n)$ models the distribution of the growth of the replanted trees (Equation 5. 4) and provides the share of wood grown at the n^{th} year after planting the trees (or after harvest).

$$f_{CR}(n) = kpe^{-kn}(1 - e^{-kn})^{p-1} \quad (5.4)$$

Parameter $k = 0.23$ represents the growth rate, and parameter $p = 3$ describes the catabolism of trees. Equation 5. 5 presents the mass of dry wood $M_{anydrewood}$ in cubic meters of wood product $V_{production\ of\ a\ wood\ product}$, with the density of the wood product ρ , and the share in product $\tau_{wood/wood\ product}$.

$$M_{anydrewood}(yk) = V_{production\ of\ a\ wood\ product}(yk) * \rho_{wood\ product} * \tau_{wood/wood\ product} \quad (5.5)$$

Equation 5. 6 presents the instantaneous sequestered CO₂ $m_{co2seq.yk}(yj)$, in year yj , by a plantation set in year yk (5. 6). In practice, it multiplies Eq. 5. 4 by Eq. 5. 5 and normalizes it to account for an assumed rotation period of 100 years with $0 \leq yk \leq yj$.

$$m_{co2seq.yk}(yj) = M_{anydrewood\ yk}(yk) * 0.5 * \frac{44}{12} * f_{CR}(yj - yk) / \sum_{yk=yk}^{yj+100} f_{CR}(yj - yk) \quad (5.6)$$

Equation 5. 7 presents the instantaneous sequestered CO₂ $m_{co2seq.}(yj)$ in year yj , by plantations set in year yk .

$$\begin{aligned} m_{co2seq.}(yj) &= \sum_{yk=0}^{yj} m_{co2seq.yk}(yj) \\ &= \sum_{yk=0}^{yj} M_{anydrewood\ yk}(yk) * 0.5 * \frac{44}{12} * f_{CR}(yj - yk) / \sum_{yk=yk}^{yj+100} f_{CR}(yj - yk) \end{aligned} \quad (5.7)$$

This model excludes the carbon content of forests and industrial residues (leaves, branches, roots, bark, chips, sawdust, and shavings). In addition, it assumes that the new trees will retain carbon endlessly.

Biogenic carbon release at the end-of-life

Because the model only includes the carbon content of the wooden structures, it assumes that burned wood (97% of the mass of wooden structures) releases its carbon content (50%) as biogenic CO₂ (Equation 5. 8) for the cogeneration scenarios.

$$m_{co2rel.yk'}(yk') = V_{EOL\ of\ wood\ products}(yk') * \rho_{wood\ products} * 97\% * 0.5 * \frac{44}{12} \quad (5.8)$$

5.2.3 Static and dynamic characterization

Static characterization factors consider the radiative forcing of GHGs under a fixed time horizon (TH). Radiative forcing occurring after the TH do not appear in the results. As TH selection affects the results, the model applied here did not set a TH. Instead, it used version 2.0 of the DynCO₂ tool [65], which includes the Bern 2.5 CC model [66] with the updated impulse response functions of non-CO₂ GHGs from the IPCC 5th Assessment Report [67].

First, two parameters defining $IDCF_{GHG_i}(n)$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$], the instantaneous dynamic characterization factor of a GHG i after its occurrence, were set: $C_{GHG_i}(n)$, the decay pattern of a GHG after pulsed emission into the atmosphere and A_{GHG_i} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$], its specific radiative forcing per unit mass (5. 9). The $IDCF_{GHG_i}$ provides the share of the specific radiative forcing of a GHG for every yearly time step of the n^{th} year.

$$IDCF_{GHG_i}(n) = \int_{n-1}^n A_{GHG_i} \cdot C_{GHG_i}(n) \, dn \quad (5. 9)$$

Equation 5. 10 presents $IR_{GHG_i}(y)$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], the instantaneous radiative forcing in year y of a dynamic inventory of a GHG i , $m_{GHG_i}(yj)$, emitted in years yj , with $0 \leq yj \leq y$.

$$IR_{GHG_i}(y) = \sum_{yj=0}^y IR_{GHG_i \, yj}(y) = \sum_{yj=0}^y m_{GHG_i}(yj) \cdot IDCF_{GHG_i}(y - yj) \quad (5. 10)$$

For all GHGs in the dynamic inventory, the instantaneous radiative forcing $IR_{GHGs}(y)$ is the sum of the instantaneous radiative forcing in year y of the dynamic inventory of GHGs emitted in years yj (5. 11).

$$IR_{GHGs}(y) = \sum_i IR_{GHG_i}(y) = \sum_i \sum_{yj=0}^y m_{GHG_i}(yj) \cdot IDCF_{GHG_i}(y - yj) \quad (5. 11)$$

Then, the cumulative radiative forcing of the inventory in year Y , $CR_{GHGs}(Y)$, is the cumulative instantaneous radiative forcing of years y with $0 \leq y \leq Y$ (5. 12).

$$CR_{GHGs}(Y) = \sum_{y=0}^Y IR_{GHGs}(y) \quad (5. 12)$$

The previous equations present the instantaneous (5. 11) and cumulative (5. 12) absolute metrics. Equation 5. 13 defines the dynamic global warming ($DGW_{GHGs/co2eq. \, yj}(Y)$ [tonne CO₂eq.]), a relative cumulative metric. In year Y , the cumulative radiative forcing of inventory

$CR_{GHGS}(Y)$ was divided by the cumulative radiative forcing of 1 kg of CO₂ emitted in the first year yj of the inventory $CR_{CO_2\ yj=0}(Y)$ [65], with $0 \leq Y \leq +\infty$.

$$DGW_{GHGS/co2eq.\ yj=0}(Y) = \frac{CR_{GHGS}(Y)}{CR_{CO_2\ yj=0}(Y)} = \frac{\sum_{y=0}^Y IR_{GHGS}(y)}{\int_0^Y A_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(y) dy} \quad (5.13)$$

The Bern 2.5CC model considers the potential absorption of CO₂ from two sinks: the oceans and terrestrial biosphere. The second sink allows for carbon uptake in the natural biosphere. It corresponds to the potential CO₂ sequestration from the stimulation of plant growth by high levels of atmospheric CO₂ and increased nutrient supply. Section 5.2.2 also considered the absorption of CO₂ but by the regrowth of trees in the managed forest. Thus, carbon uptake could potentially be accounted for twice by the Bern 2.5CC model (Section 5.2.3) and by the forest regrowth model [70] (Section 5.2.2). However, this should not be the case, because the Bern 2.5CC model does not include a formulation for forestry management [175]. It consists of chemistry, radiative forcing, climate, and carbon cycle modules [66].

The static assessment aggregates the entire inventory, regardless of the yj moment of emission, sequestration, or gas avoidance ($\sum_{yj=0}^{+\infty} m_{GHGi}(yj)$). Then, the static assessment multiplies the GHGs of the inventory by their respective characterization factors, which are all defined on a given TH (Eq. 5.14). Equation 5.15 defines the static global warming ($SGW_{co2eq.\ (TH)}$ [tonne CO₂eq.]), a relative cumulative metric.

$$GWP_{GHGi/co2eq.\ (TH)} = \frac{\int_0^{TH} A_{GHGi} \cdot C_{GHGi}(y) dy}{\int_0^{TH} A_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(y) dy} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} SGW_{\frac{GHGS}{co2eq.\ (TH)}} &= \sum_i SGW_{\frac{GHGi}{co2eq.\ (TH)}} = \\ &\sum_i \sum_{yj=0}^{+\infty} m_{GHGi}(yj) \cdot GWP_{GHGi/co2eq.\ (TH)} \end{aligned} \quad (5.15)$$

5.2.4 Summary of the scenarios and the system boundary

This section summarizes the combination of the two alternative scenarios and the three EOL scenarios. Figure 5.2 shows the system boundaries of the scenarios, and Table 5.1 lists the names of the scenarios.

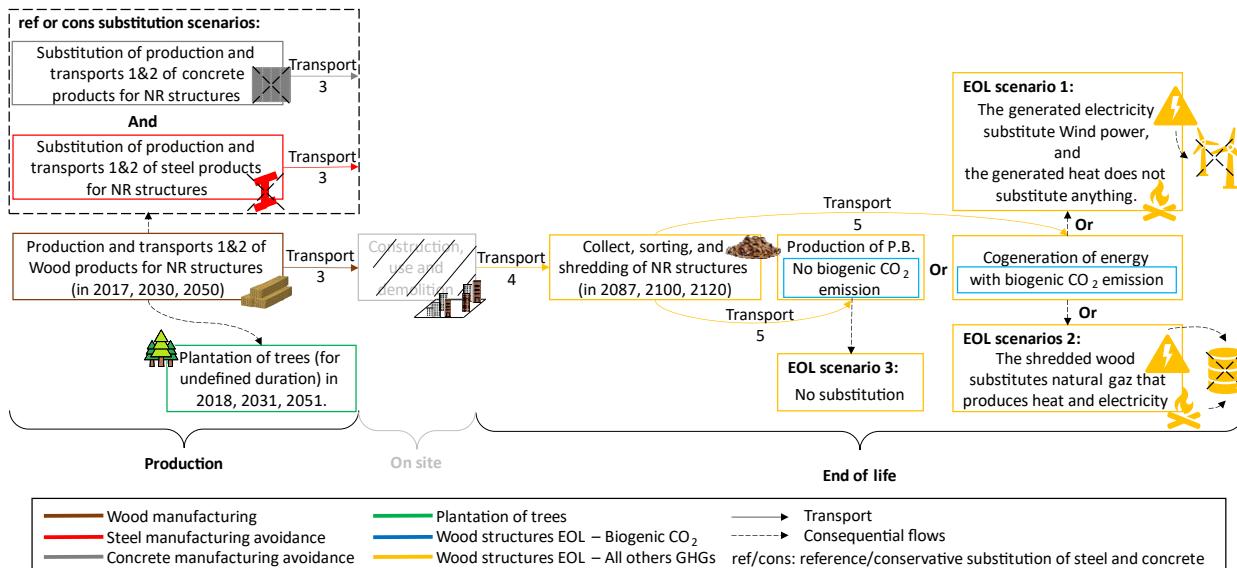


Figure 5.2 : System boundaries of each scenario

Table 5. 1 : Name of the scenarios

Scenarios of EOL wood structures	Steel and concrete substitution	
	Reference substitution	Conservative substitution
1 - Cogeneration of heat and electricity. The generated electricity substitutes the potential wind turbine power. The generated heat does not substitute another heating source.	ref-1	cons-1
2 - Cogeneration of heat and electricity that substitutes a natural gas-based cogeneration of heat and electricity.	ref-2	cons-2
3 - Particleboard without any substitution.	ref-3	cons-3

5.3 Results and discussion

5.3.1 Reference substitution scenario

Figure 5.3 shows the cumulative radiative forcing of GHG emissions normalized to 1 tonne of CO₂ emitted in 2017, based on using (recycling) wooden structures in the cogeneration of heat and electricity.

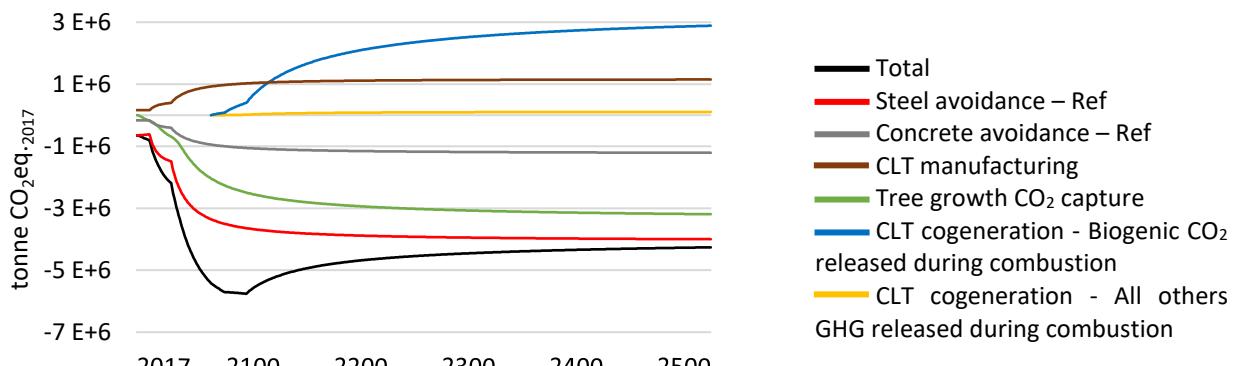


Figure 5. 3 : Cogeneration with end-of-life structures – Scenario ref-1

In the short term, during the first 30 years of construction of new non-residential structures, the growth of new trees amplifies the effect of steel and concrete substitution. In the medium term, when the structures reach the end of their life, the emissions are not sufficient to reach a positive balance. The impacts of cogeneration, excluding the biogenic CO₂ contained in the wood, are positive but not a major contributor to the total result. It is the avoidance of wind turbine production that allows a low impact. Only the biogenic CO₂ re-emitted during combustion can change the total long-term result. In the very long term, the biogenic CO₂ should offset the effect of the sequestered CO₂. In 2550, the CO₂ sequestration through tree growth results in -3.2 E6 tonnes CO_{2eq.2017}, and the biogenic CO₂ released by CLT cogeneration results in +2.9 E6 tonnes CO_{2eq.2017}.

The other two EOL scenarios with reference substitution showed different curves only for the total avoidance (black curves) and EOL impacts (yellow and blue curves). In the ref-2 scenario (Figure C. 6 in supplementary information C), the avoidance of natural gas for combined heat and power (CHP) is more advantageous than cogeneration with EOL wooden structures, which only avoids electricity production from wind power generation (Figure 5. 3). However, ref-2 avoids more impacts than ref-1. In the ref-3 scenario (Figure C. 7 in supplementary information C), the PB recycling model (yellow curve) had a higher impact than cogeneration with electricity substitution. Because PB recycling assumes that carbon remains in the wood, the total result of ref-3 is lower than that of ref-1 (Figure 5. 3) and ref-2 (Figure C. 6). However, this result is only temporary, because when the use of PB ends, other wood uses and substitutions may be possible leading to the emission of biogenic CO₂.

5.3.2 Conservative substitution scenario

Compared to scenarios ref-1 (Figure 5. 3), ref-2 (Figure C. 6), and ref-3 (Figure C. 7), only the material substitution was different in conservative scenarios. 1 kg of structural wood product displaced less steel and concrete than in the reference scenarios. Also, the CC impacts of steel and concrete supply were also lower (CC impacts of conservative steel = 22% CC impacts of reference steel, and CC impacts of conservative concrete = 4% CC impacts of reference concrete). Thus, conservative substitution scenarios can lead to CC [163].

As shown in Figure 5. 4, the total result is positive in the long term, mostly because substitution is insufficient and biogenic CO₂ emissions offset the sequestration effect. As for the reference substitution scenarios, the other two EOL scenarios with conservative substitution showed different curves only for the total avoidance (black curves) and EOL impacts (yellow and blue curves). Regarding cons-2 (Figure C. 9 in supplementary information C), despite the conservative substitution and compensation of sequestration by long-term biogenic CO₂ emissions, the total impact remains negative. The avoidance of natural gas for CHP contributes to the overall result in the long-term. Finally, scenario cons-3 (Figure C. 10 in supplementary information C) showed the same conclusions as in scenario ref-3 (Figure C. 7), i.e., the non-emission of biogenic CO₂ maintains a negative total impact.

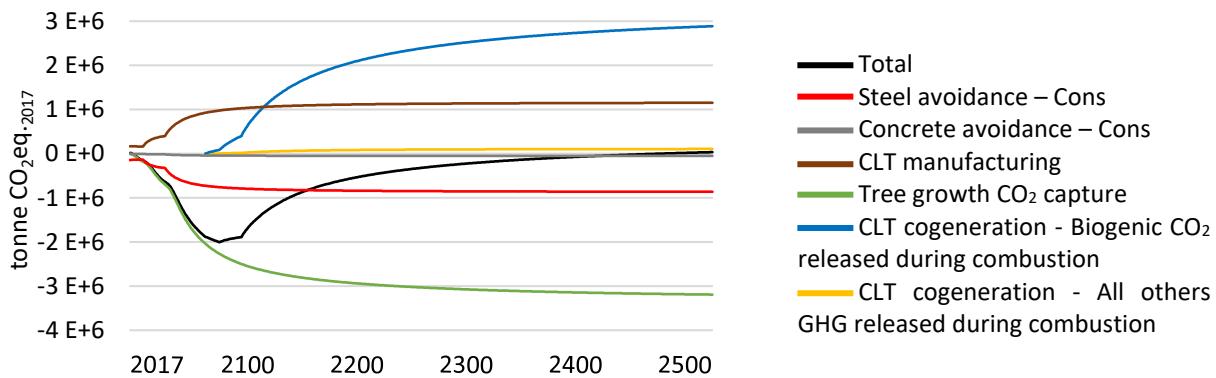


Figure 5. 4 : Cogeneration with end-of-life structures – Scenario cons-1

However, interpretations should not consider these results as accurate predictions of the displacement of CC impacts regarding the construction of new non-residential structures as the model used here has some limitations that should be noted. The discussion tackles different scenarios and CC impact metrics.

5.3.3 Comparison of the scenarios

Figure 5. 5 summarizes the two substitution scenarios and the three EOL scenarios and indicates a range of possible results.

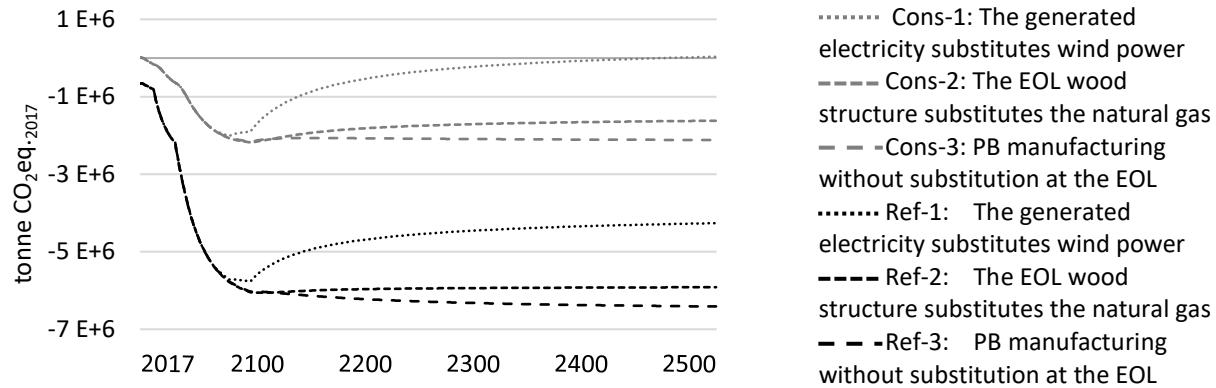


Figure 5. 5 : Comparison of the conservative and reference substitution scenarios

Even if cogeneration can avoid GHG emissions, extended carbon storage in the PB had less impact (Figure 5. 5). Indeed, biogenic CO₂ emissions contribute the most to the EOL scenarios (In Figure 5. 3, Figure C. 6, Figure 5. 4, and Figure C. 9, the amplitude of the blue curve was greater than that of the yellow curve). Further studies should determine the number and types of cascading scenarios that will involve a total impact of zero. In the case of conservative substitution, forest regeneration had a negative impact at the beginning of the life cycle. In the absence of sequestration, the impact would be positive.

As technologies are likely to improve in the future, supplementary information C presents a sensitivity analysis of the GHG intensities of steel ingots and cement production in 2030 and 2050. Roadmaps and other references [176]–[179] do not systematically specify the boundaries of GHGs reduction or whether it is a reduction in CO₂ or CO₂eq. Therefore, such reduction applies to the GHG inventory of the unit processes of cement and steel ingot production allowing for a conservative assessment. The model used here considered a GHGs reduction of 25% in 2030 and 38% in 2050 for cement production; for steel ingot production, the reduction was of 30% in 2030 and 60% in 2050. Supplementary information C presents the reference and conservative scenarios for decreasing GHG emissions intensity for steel ingot and cement production (Figures C. 11, 12, 13, 14, 15, and 16). There was no significant change in the interpretation of the results or conclusions of the three EOL scenarios for both the reference and conservative scenarios. In the conservative substitution scenario with cogeneration, replacing

only electricity (Figure C. 14) showed an earlier impact on CC than the same scenario with constant GHG intensity (Figure 5. 4). For the other five scenarios, the avoided impact was lower with decreasing GHG intensity than with constant intensity. However, the signs of the curves did not change.

A limitation of the present study was the beginning of the life cycle. After harvesting, the residues left on the ground decompose and emit GHGs. In addition, new tree growth in the year following harvest may involve elementary processes, such as the use of agricultural machinery, which are missing in the scenarios modeled here. Thus, the model underestimates the impacts at the beginning of the life cycle. Moreover, if timber production avoids the consumption of structural steel and concrete, it will also avoid the downstream recycling of these substituted materials. Such avoided burdens are currently missing in the model, which constitutes a limitation of the present study. However, avoiding the potential future recycling of steel and concrete could contribute to a shortage of these recycled materials in their corresponding markets that could lead to an increased demand for virgin materials. Whether this demand is because of the increasing use of wood in buildings or the evolution of future markets for substituted materials should be modeled as rebound effects, which is complex but worth to be included in future studies.

5.3.4 Absolute and relative metrics

The discussion of the different metrics is more interesting in the conservative substitution scenario, where cogeneration substitutes electrical energy but not heat energy (Figure 5. 4). Indeed, as shown in Figure 5. 6, the total instantaneous radiative forcing in this scenario exhibits a sign change. The top part presents the instantaneous radiative forcing, which is proportional to the atmospheric burden of the GHGs. The middle part shows the cumulative radiative forcing over previous years. The cumulative radiative forcing at Y_i indicates that from Y_0 to Y_i , there were more (if positive) or fewer (if negative) radiative forcings than avoided and absorbed. This is the balance of emissions, avoidance, and removal between the start year of the calculation Y_0 and the observation year Y_i . Finally, the bottom part represents the cumulative effect over the previous years compared to that of 1 tonne of CO₂ emitted in year Y_0 .

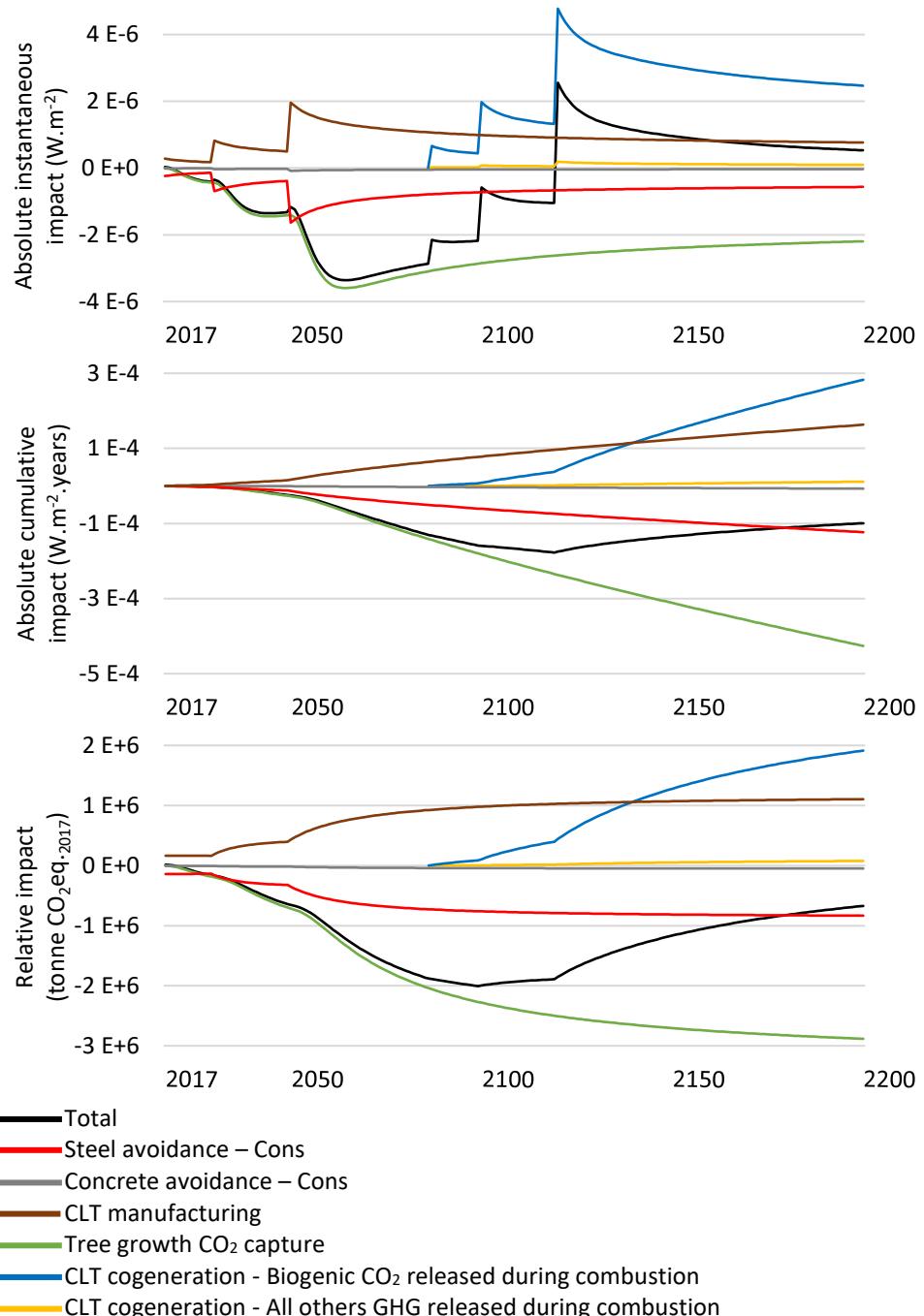


Figure 5. 6 : Scenario cons-1 - Instantaneous (top panel), cumulative (middle panel), and relative cumulative (bottom panel) radiative forcing

Except for the total curve, the resulting instantaneous radiative forcing was either positive or negative, and thus the same for the cumulative radiative forcing over the years and for the equivalent CO_2 . However, regarding the total curves, the absolute instantaneous metric shows the onset of adverse effects (approximately 2120), which is difficult to determine from absolute

cumulative and relative metrics. With these two last indicators, in this scenario, a very long TH is necessary to determine when the balance of GHG emissions, avoidance, and sequestration will contribute to CC (around the year 2500).

5.3.5 Static and dynamic characterization

To discuss the static and dynamic approaches, we constructed Figure 5. 7, which shows the work of Cordier *et al.* (2021) with the dynamic approach. Table 5. 2 displays the static and dynamic values for three TH (20, 100, and 500 years). To maintain consistency with the dynamic model used in the present study, we used the work of Cordier *et al.* (2021) with the characterization factors of the 5th IPCC report [67] although Cordier *et al.* (2021) used Impact 2002+ [131], a method based on the GWP500 of the 3rd IPCC report [180] and considering carbon monoxide.

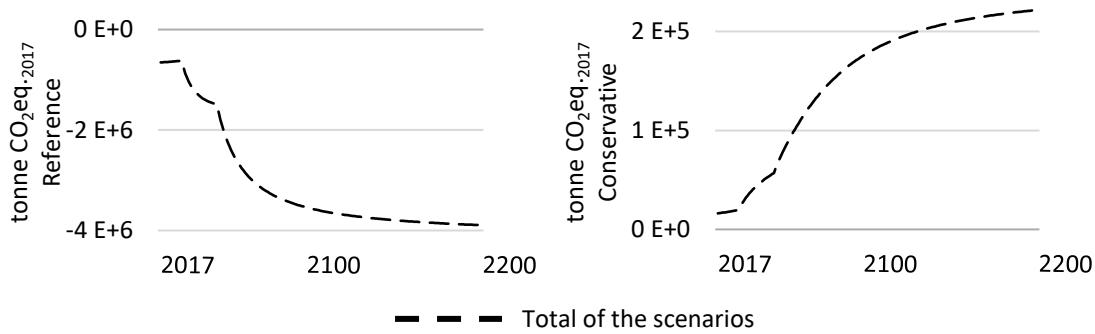


Figure 5. 7 : Dynamic climate change assessment in the construction supply chain by simultaneously substituting steel and concrete with wood

Table 5. 2 : Comparison of the dynamic relative indicator (tonne CO₂eq. of Figure 5. 7) with the static approach

Scenario	Approach	TH 20 years (2037)	TH 100 years (2117)	TH 500 years (2517)
Reference	Static (tonne CO ₂ eq.)	-5,15 E+6	-4,45 E+6	-4,21 E+6
	Dynamic (tonne CO ₂ eq.2017)	-1,25 E+6	-3,66 E+6	-4,06 E+6
Conservative	Static (tonne CO ₂ eq.)	1,84 E+5	2,42 E+5	2,43 E+5
	Dynamic (tonne CO ₂ eq.2017)	4,03 E+4	1,91 E+5	2,35 E+5

In the study by Cordier *et al.* [163], the balance between the avoided and emitted GHGs was either always positive (conservative substitution) or always negative (reference substitution). Thus, it cannot lead to opposite conclusions between static and dynamic evaluations. The static assessment overestimated the impact but this overestimation decreased over time. However, when the LCI is sometimes positive and sometimes negative, the conclusions of the static and

dynamic assessments are misleading (Figure 5. 4 and Table 5. 3) because they lead to opposite conclusions.

Table 5. 3 : Comparison of the dynamic relative indicator (tonne CO₂eq. of Figure 5. 4) with the static approach

Approach	TH100 years	TH 500 years
Static (tonne CO ₂ eq.)	3,75 E+5	3,66 E+5
Dynamic (tonne CO ₂ eq. ₂₀₁₇)	-1,90 E+6	1,15 E+4

Unsurprisingly, the aggregated static impacts showed little difference (2%). Indeed, CO₂ is the gas contributing the most to the entire dynamic inventory, regardless of the TH (more than 83% of all GWP 100 and 500, see supplementary information D). Table 5. 3 and Figure 5. 4 show that the impact of CC in 2117 (TH100 years) will be equivalent to the cumulative effect of 3.75 E+5 tonnes of CO₂ released 100 years earlier based on the static approach, while it will be equivalent to the cumulative effect of 1.9 E+6 tonnes of CO₂ avoided based on the dynamic approach.

For the 100 years TH, the dynamic impact was lower than the static impact because the emissions after 2117 were not included in the former. Indeed, the EOL of the 2050 new structures occurs in 2120 and there is more avoidance and absorption than emissions before 2117. These emissions are considered in the static approach because the entire inventory is aggregated in one year. For dynamic impacts, forest growth begins immediately after harvest. Therefore, after 100 years (2117), all three harvests (2017, 2030, and 2050) were almost 100% regenerated. The biogenic CO₂ re-emitted at the EOL, in 2087 and 2100, partially offsets this regeneration. Moreover, the faster the forest regenerates, the more negative the short-term dynamic impact. Finally, as derived from Equation 5. 13, the later an emission appears in the inventory, the lower its CO₂ equivalent (emitted in 2017, i.e., CO₂eq.₂₀₁₇) will be in the short term. In the longer term, with a TH far from the last emission of the inventory, the cumulative effect of each of the two CO₂ emissions (for example, 2017 and 2087) will be more equivalent. Indeed, 1 kg of CO₂ released in 2017 will have a higher cumulative effect until 2117 than that of 1 kg of CO₂ released in 2087. Therefore, the cumulative impact of the denominator of Equation 5. 13 (taken in 2017) is equal to 1 kg of CO₂ released in 2017 and larger than 1 kg of CO₂ released in 2087. This time lag between the reference (denominator) and an emission of the

inventory (numerator) explains the steps in the first year (2017) of the dynamic indicator that do not exist in other years (see steel and CLT manufacturing curves in Figure 5. 4). Therefore, for the 500 years TH, the dynamic and static impacts were much closer. Moreover, both considered the entire inventory.

Regardless of the TH of the dynamic assessment, the time lag reverses the logic between the inventory and the result of sequestration, followed by its re-emission at the EOL. In the inventory, the quantity of CO₂ sequestered is equal to the quantity that is re-emitted instantaneously at the EOL but spreads out over time (depending on the growth rate of the trees). However, as displayed in Figure 5. 3, Figure C. 6, Figure 5. 4, and Figure C. 9, the decrease in the CC impact of sequestration was faster than the increase in the CC impact of biogenic CO₂ emissions. Supplementary information C provides further details.

In contrast to static LCA, dynamic LCA is consistent when inventory and impact are time-dependent. It is also consistent when the inventory occurs over a long period for CO₂ sequestration and corresponding biogenic CO₂ emissions. Despite the need for complex modeling, dynamic assessment makes it possible to visualize the evolution of CC impacts on both current and future generations. In some cases, the static approach yields opposite conclusions to the dynamic approach. In addition, it does not show that the result is an accumulation of negative and positive emissions, or vice versa. In a context where it is necessary to avoid the concentration of GHGs exceeding a threshold, the decision-maker may prefer a solution that avoids the impact at the beginning of the life cycle. This would allow time for the GHGs currently in the atmosphere to dissipate.

5.4 Conclusion

This study contributes to assess the potential CC consequences of the increased use of wood in construction. To address this research problem, dynamic methods were combined to consider potential material substitution, carbon storage in long-lived and slow-growing wood products, and EOL opportunities on a regional scale. In addition, it addresses the static and dynamic metrics of radiative forcing and the CO₂ equivalent for decision support.

Regarding the case study, the environmental assessment highlighted the influence of material substitution, carbon storage, and EOL. In the reference substitution scenario, material

substitutions were the main contributors to the total negative impact. The impact was negative for all three EOL scenarios. In the conservative substitution scenario, post-harvest CO₂ sequestration resulted in a negative impact during the first few years. The total balance over the whole life cycle and beyond depends on EOL strategies and their possible consequences. This work allows understanding in which cases avoidance and EOL strategies are decisive, as well as the influence of quantifying temporary carbon storage.

The results showed that the conventional static LCA overestimated the long-term cumulative CC impact (tonne CO₂eq.) without providing information on the short-term impact of the case study. In studies that include elementary flows with values sometimes greater than or less than zero, the static approach may lead to opposite conclusions to the dynamic approach. The absolute metrics (W.m⁻²) should support the relative metrics (tonne CO₂eq._{1st.year}). Indeed, the instantaneous absolute metric changes sign earlier than the cumulative absolute and relative metrics and avoids confusing interpretations.

Dynamic metrics provide complementary information. Therefore, a decision-maker using the dynamic relative metric (tonne CO₂eq._{1st.year}) should use it with the corresponding absolute metrics.

CHAPITRE 6 : DISCUSSION ET LIMITES

Le premier article porte sur une méthodologie permettant d'estimer l'utilisation potentielle de matériaux de construction dans le secteur de la construction NR. La méthode présentée a été appliquée pour estimer le volume de bois dans les structures des nouveaux bâtiments NR. Cette quantité est le flux de référence de l'ACV-C. Les études, qui estiment la consommation de matériaux, considèrent principalement l'intensité matérielle par mètre carré (kg/m^2) et les données statistiques sur la surface plancher totale (m^2) [84], [92]–[94] selon le type de bâtiment et la période de construction. Elles peuvent également considérer l'intensité matérielle par habitant et la population du pays. Ces analyses sont principalement appliquées aux bâtiments résidentiels grâce à une plus grande disponibilité de données. Par conséquent, la méthode présentée pour estimer la quantité de bois doit être comparée à ces autres méthodes qui utilisent ces paramètres, sous réserve de données disponibles. Nepal *et al.* (2016) ont désagrégé la quantité totale de bois utilisé en deux groupes par des données de comptabilité nationale. Les deux groupes sont les bâtiments non résidentiels et le reste [36]. Pour le scénario de base des Etats-Unis, l'utilisation estimée de bois d'œuvre résineux passe d'environ $4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [36] en 2010 pour 308,745,538 habitants [181] à environ $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ [36] en 2050 pour 388,900,000 habitants [182]. Cela revient à 12.95 m^3 et 23.14 m^3 par millier d'habitants en 2010 et 2050. La méthode présentée dans le premier article estime l'utilisation moyenne du bois d'œuvre résineux à $44,743 \text{ m}^3$ en 2010 pour 7,885,717 habitants [117] et à $234,315 \text{ m}^3$ en 2050 pour 9,550,000 habitants [118] au Québec. Cela revient à 5.67 m^3 et 24.54 m^3 par millier d'habitants en 2010 et 2050. L'ordre de grandeur entre Nepal *et al.* (Etats-Unis) et le premier article (Québec) est semblable. Cependant, la part des bâtiments non résidentiels en bois est inconnue pour les Etats-Unis. Les paramètres de l'estimation (Eq. 3. 2) proviennent de sources différentes et leur interdépendance n'a pas pu être modélisée. Le scénario moyen est fait avec les paramètres moyens, le scénario maximum (respectivement minimum) est fait avec les numérateurs maximums (respectivement minimums) et le dénominateur minimum (respectivement maximum). Les scénarios qui cadrent l'estimation devraient être présentés avec leur probabilité. Par exemple pour le scénario maximum, cela correspond à la proportion des bâtiments avec une structure en bois pour lesquels le coût au mètre cube de bois est faible et le permis de construire ainsi que le coût de la structure par rapport au coût de construction sont élevés. Pour mettre en perspective l'estimation, elle a

été évaluée par rapport à la récolte totale. Cela permet de comprendre comment l'utilisation estimée contribue à atteindre la possibilité forestière. Les résultats montrent une contribution maximale de 5%. Ensuite, 3 scénarios futurs de l'estimation ont été proposés pour modéliser le changement de quantité utilisée du bois. L'objectif de ces scénarios n'est pas de générer des prévisions précises, mais d'explorer le changement. Dans les scénarios, plusieurs paramètres évoluent dans le temps. Les permis de construire évoluent en corrélation avec des prédictions de la population. Le pourcentage des nouvelles structures en bois évolue selon des scénarios exploratoires en cohérence avec la problématique du cas d'étude : augmenter l'utilisation du bois dans les bâtiments NR. Le coût de la structure en bois évolue selon la tendance du coût du bois d'œuvre résineux. L'évolution de ces paramètres selon 3 scénarios (minimum, moyen, et maximum) conduit à une augmentation totale de l'utilisation du bois dans les nouvelles structures, excepté pour les 10 dernières années du scénario minimum, car la population baisse et, car l'augmentation du pourcentage des nouvelles structures en bois est trop faible. Les projections du permis de construire et du pourcentage des nouvelles structures en bois ont aussi été testées selon la tendance des années passées, mais cela n'a pas changé les conclusions. Dans la littérature, c'est principalement l'évolution de la population qui détermine l'évolution des nouvelles demandes [36], [88], [95], [96], [183]. Kayo *et al.* (2018) ont modélisé une augmentation de l'utilisation du bois dans les infrastructures et le mobilier du Japon. Cependant, pour leurs scénarios d'utilisation courante et en augmentation modérée, les prédictions de baisse de population conduisaient à une baisse de l'utilisation totale du bois [95]. La méthode d'estimation peut servir dans une analyse des flux de matière du secteur du bâtiment et aider à créer un inventaire des flux de produit pour une ACV.

Dans le chapitre 3, les exportations de bois d'œuvre résineux ont représenté environ 50 % de la récolte totale au cours des dix dernières années et sont principalement à l'origine de la tendance historique de la récolte totale. Cela implique que la récolte pour les nouvelles structures NR pourrait ne pas être la principale branche du marché qui contribuerait à atteindre la limite avant 2030. L'augmentation des exportations suivant leur tendance est hypothétique car la projection ne considère pas l'activité économique et les mises en chantiers des États-Unis (principal importateur).

Il existe une complémentarité entre certains produits en bois. Par exemple, les industries des panneaux particules (non structuraux) et des pâtes et papiers consomment des co-produits du

bois d'œuvre. Cependant, la qualité de ces co-produits les rend plus attrayants que les résidus de démolition à recycler. Autre exemple, la production conjointe du bois d'œuvre résineux et des panneaux à copeaux orientés (*OSB - oriented strand board*, faits à partir des feuillus) permet l'exploitation de forêts mixtes. Cependant, l'OSB et le contreplaqué peuvent être en concurrence [203]. Une plus grande désagrégation entre les différents produits du bois et leurs secteurs est donc nécessaire pour mieux cibler les conséquences potentielles liées à leurs complémentarités et concurrences. L'utilisation de modèles économiques peut apporter un éclairage.

A partir du flux de référence estimé, des conséquences physiques sont évaluées dans le quatrième chapitre. Celles-ci sont la substitution de matériaux et l'hypothèse d'une augmentation de l'importation de bois rond en cas de possibilité forestière insuffisante (chapitre 3).

Pour modéliser la substitution de matériaux, des facteurs de substitution fonctionnelle ont été élaborés à partir de cas d'études qui comparent des bâtiments dont la structure est principalement en bois à des bâtiments dont la structure est principalement en acier et/ou en béton. Ces facteurs de substitution résument la quantité potentielle d'acier et/ou de béton qui peut être substituée par une masse de produits en bois ajoutée dans un bâtiment. Les facteurs sont obtenus sur le critère de la fonction d'une structure seulement. L'élaboration de ces facteurs est indépendante du chapitre précédent, ils peuvent être appliqués à un cas d'étude dont l'utilisation d'un des matériaux de structure (acier et béton, ou bois) est croissante ou décroissante. Le chapitre 4 (Table B. 20) analyse la sensibilité des impacts environnementaux (CC, ressources, qualité des écosystèmes, et santé humaine) par rapport à la variabilité des facteurs de substitution et des grades d'acier et béton substitués. L'analyse montre que ce sont les valeurs extrêmes des facteurs (c.-à-d. des quantités déplacées) qui contribuent le plus aux impacts environnementaux minimums et maximums que les grades minimums et maximums d'acier et béton. Deux points sont à souligner pour les facteurs de substitution minimum et maximum : leurs valeurs et leur probabilité d'occurrence à l'échelle régionale. Les valeurs du facteur minimum $sf_{steel, concrete}$ (0.13; 0.22) sont construites avec la substitution minimale de l'acier indépendamment de la substitution correspondante du béton (Tableau 4. 1), et avec la substitution minimale du béton indépendamment de la substitution correspondante de l'acier. La construction du facteur de substitution maximum $sf_{steel, concrete}$ (1.39; 11.56) suit le même raisonnement avec les valeurs maximales. Cela a permis de contenir tous les cas du tableau 4. 1 (voir Figure B. 9). Pour plus

de représentativité, le facteur minimum (respectivement maximum) aurait pu être celui du cas d'étude qui conduit au résultat minimum (respectivement maximum) dans les différentes catégories d'impact. Donc, le facteur minimum serait probablement celui tiré de Dong *et al.* (2020) [129], et le maximum de Scheuer *et al.* (2003) [128]. En ce qui concerne la probabilité d'occurrence des facteurs extrêmes pour une région, l'échantillon des données, à partir duquel ils sont construits, a permis d'établir une distribution (Figure B. 3). Une plus grande collecte de données permettrait une distribution plus représentative. Exploiter cette distribution plutôt que les valeurs extrêmes et la moyenne permettrait d'affiner le résultat et de le présenter avec sa probabilité.

Puisque les mesures et technologies de décarbonation peuvent conduire à une diminution de l'impact CC de la production des matériaux utilisés et substitués, les avantages de la substitution peuvent avoir une date d'expiration [55]. Le chapitre 5 considère une diminution de l'intensité carbone liée au procédé de fabrication du ciment et des brames d'acier. L'évitement d'impact au CC est donc diminué. Cependant, le manque de données ne permet pas la modélisation de ces procédés, faisant ainsi obstacle à l'évaluation de leurs conséquences sur les autres indicateurs environnementaux. Pour aller plus loin, une réduction supplémentaire des émissions de GES pourrait être appliquée aux trois matériaux par rapport aux sources énergétiques utilisées, si le réseau se décarbonise.

L'analyse est limitée aux fournisseurs qui peuvent modifier leur capacité de production afin de répondre au changement cumulé de la demande du bois. Ils sont identifiés en remontant les intrants de la chaîne de production et de fin de vie. Dans le cas où la possibilité forestière est atteinte, cela peut avoir plusieurs conséquences comme provoquer une compétition entre les secteurs qui utilisent le bois, une modification des prix, impliquer une diminution des exportations, ou une augmentation des importations. Considérer les caractéristiques importantes du marché comme la sensibilité de l'offre et de la demande aux fluctuations de prix (l'élasticité de l'offre et de la demande) et les effets rebonds apporterait une représentativité économique, dans le cas d'un marché où les achats sont rationnels. Plusieurs outils économiques peuvent être utilisés pour considérer les réponses du marché, notamment les modèles d'équilibre partiel et général et les courbes d'expérience [184]. Les modèles d'équilibre sont guidés par l'offre, la maximisation de l'utilité du consommateur et la maximisation du profit du producteur [185]. Le modèle partiel (modèle économique du secteur en question) ignore les interactions entre les

marchés, alors que dans le monde réel, la substitution implique des élasticités croisées, c'est-à-dire le changement de la demande/l'offre d'un bien en réponse à un changement du prix d'un autre bien [8]. Les modèles d'équilibre général peuvent considérer les interactions entre les secteurs, mais avec niveau d'analyse plus agrégé [186]. Les courbes d'expérience qui modélisent les gains d'efficacité dus à une expérience accrue peuvent être utilisées dans le cadre de la modélisation de scénarios, de la modélisation économique et en tant que technique autonome [184]. De même, seule la substitution fonctionnelle entre le bois et l'association de l'acier et du béton est considérée. La substitution de prix et la réponse du marché et ne le sont pas.

Dans ce chapitre, les résultats de la phase de production montrent des conclusions pour la qualité des écosystèmes qui sont opposées aux trois autres indicateurs, principalement car l'occupation du sol est la plus importante pour la récolte. Bien que l'occupation de la surface soit considérée, la capacité de celle-ci à se régénérer ne l'est pas [131], [150]. De plus, peu d'études ont étudié la réponse de la diversité biologique aux pratiques de production de biomasse [187].

Pour compléter le cycle de vie du bois dans la construction, la croissance des arbres et la fin de vie des produits bois ont dû être modélisées dans le cinquième chapitre.

La modélisation de la croissance des arbres permet de simuler la séquestration du carbone atmosphérique lors de la photosynthèse. Le choix d'attribuer la séquestration avant ou après la récolte et la production de bois affecte le résultat. Étant donné que le scénario après entraîne un impact plus élevé sur le changement climatique que le scénario avant [59], [60], [72], l'absorption de carbone biogénique est modélisée après la récolte pour avoir une approche conservatrice. Cependant, pour des raisons de gestion durable, les décisions d'aménagement forestier et de possibilité forestière ne sont pas définies à l'échelle de la récolte annuelle, mais à l'échelle d'un territoire forestier. Donc, en pratique, la séquestration ne commence pas dans sa totalité avant ou après la récolte. Les arbres supposés régénérer une récolte ne commencent pas leur pousse tous en même temps. Les récoltes et les repousses ont lieu simultanément [188]. Aussi, la régénération est simulée sans perturbation (mort prématuée, tempête, feux, insectes) jusqu'à arriver à maturité. Une fois arrivée à maturité, l'évolution des arbres et l'entretien de la forêt ne sont pas considérés. Pour ces raisons, un modèle forestier serait donc nécessaire.

La littérature met en avant une comparaison entre l'augmentation des puits de carbone forestiers et la promotion du remplacement du bois [157]. La modélisation de Schulte *et al.* (2022) suggère que la diminution des niveaux de récolte et la prolongation des rotations augmenteraient les avantages climatiques nets par rapport aux pratiques forestières suédoises actuelles. Cela correspond à d'autres résultats [158]–[160], mais certains modèles montrent que l'utilisation du bois pour la substitution est avantageuse [161], [162]. Cependant, la littérature souligne la nécessité de développer des modèles de croissance forestière qui tiennent compte des changements de température potentiels, de la répartition annuelle des précipitations prévues, des changements dans les taux de décomposition, et d'autres risques accrus de perturbations naturelles extrêmes (incendies, parasites, tempêtes, etc.) [158]–[162], [189]–[192]. En effet, on peut se demander à partir de quel taux de dégradation de la forêt, la récolte évite la réémission de gaz à effet de serre biogénique par les feux et d'autres causes de décomposition d'arbres morts. Cela peut également accentuer la concurrence entre les produits forestiers et justifie aussi l'utilisation d'un modèle économique et d'un modèle de gestion forestière. La prise en compte du carbone dans les sols et la litière est également importante [193]. Ces questions doivent être regardées, non seulement, pour le changement climatique mais aussi pour les autres impacts environnementaux tels que la qualité des écosystèmes. Enfin, les pratiques courantes actuelles excluent l'impact climatique du changement indirect d'utilisation des terres, des aérosols, et le changement d'albédo [63], notamment pour les régions fréquemment enneigées [194].

L'indicateur relatif dynamique ($\text{CO}_2\text{eq}_{\text{année}0}$), comme l'indicateur statique, compare le forçage radiatif de l'inventaire qui est cumulé au cours du temps (mémoire des émissions de l'inventaire) au forçage radiatif cumulé de 1 kg de CO_2 apparaissant au début de l'inventaire. Cela signifie qu'à une certaine année, l'impact de l'inventaire est équivalent à une certaine masse de CO_2 émis à l'année 0, et qu'à une autre, l'impact de l'inventaire est équivalent à une autre masse de CO_2 émis à l'année 0 également. Ceci peut complexifier l'interprétation. De plus, le CO_2eq . (statique ou dynamique) est insuffisant car « il existe au moins trois types d'impacts du changement climatique [195]–[199] qui peuvent être classés en fonction de leur relation fonctionnelle avec l'augmentation de la température : (1) l'impact lié directement à l'élévation de la température; (2) l'impact lié à la vitesse du réchauffement; et (3) l'impact lié au réchauffement cumulatif » [68]. Les indicateurs absous du forçage radiatif instantané ou cumulé sont donc nécessaires pour apporter plus de clarté à l'interprétation du CO_2eq .

Il a été supposé que l'enfouissement (induit ou évité) ne fit pas partie des scénarios de fin au moment où les premières structures construites sont démolies (2077). Cette hypothèse considérait l'objectif du gouvernement d'interdire l'enfouissement des matières organiques [173], [200]. Cependant, il existe encore du bois de déconstruction enfoui [201]. Dans le cas où l'enfouissement sera toujours d'actualité, une partie du carbone contenu dans le bois sera séquestrée de façon permanente et une autre sera émise, non seulement sous forme de CO₂, mais aussi sous forme de CH₄ [60], [61], [202]. De plus, l'émission due à la décomposition ne serait pas instantanée, mais se produirait sur plusieurs années. D'autres scénarios de fin de vie pourraient voir le jour. Les résidus de bois pourraient être utilisés pour fabriquer des panneaux d'insonorisation [201]. Des études, représentatives à l'échelle du laboratoire, ont modélisé un recyclage du bois lamellé-collé (résineux) en OSB [203], [204]. Au Québec, le procédé de fabrication très automatisé et l'utilisation d'essences de bois feuillus sous-utilisées ont permis à l'OSB de prendre des parts de marché de plus en plus grandes au détriment du panneau contreplaqué [205]. Dans le cas d'un recyclage en OSB, l'évitement potentiel de bois vierge feuillu et la concurrence avec le contreplaqué sont à considérer. Enfin, concernant le premier scénario de fin de vie, où l'incinération des structures produit de l'électricité sans récupération de chaleur, il est conservateur car les chaudières qui produisent de l'électricité peuvent aussi utiliser la chaleur. La sous-estimation potentielle de l'impact CC évité est comblée dans le cas où les structures évitent le gaz naturel qui produit conjointement de l'électricité et de la chaleur (second scénario de fin de vie). Pour le troisième scénario de fin de vie, les impacts potentiels impliqués peuvent aussi avoir été sous-estimés ou non. En effet, si la consommation des panneaux particules reste constante, certains intrants à leur production peuvent être réalloués à d'autres utilisations. Si la consommation des panneaux particules augmente, un autre produit pourra être remplacé. La limite réside dans la modélisation des conséquences en cascade.

Une autre limite dans les scénarios concerne l'absence de modélisation de la fin de vie évitée de l'acier et du béton. L'utilisation du bois évite la demande équivalente d'acier et de béton (selon les facteurs de substitution [4.2.2]). Donc la production d'acier et du béton est évitée, ainsi que leur fin de vie. Les impacts de fin de vie (dus aux transports et procédés de recyclages) ne sont pas modélisés comme impacts évités, ce qui est conservateur car l'avantage du bois pourrait être plus important. Cependant, la non-disponibilité future de l'acier et du béton recyclés n'est pas non plus modélisée. Cela pourrait impliquer une consommation marginale future de matières

vierges dans le cas où les capacités de production de l'acier et du béton recyclés sont inférieures à leur demande. On peut alors se demander si cette future consommation de matières vierges sera la conséquence de l'utilisation croissante actuelle du bois, ou des marchés qui les consommeront par manque de matières recyclées. Puisque ces effets sont complexes à modéliser, des travaux futurs devront explorer davantage ces phénomènes. De plus, modéliser la fin de vie du béton implique aussi de considérer sa carbonatation lorsqu'il est transformé en granulats [206].

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS, CONTRIBUTIONS, ET TRAVAUX FUTURS

7.1 Résumé

Les travaux de recherche portent sur une modélisation environnementale des activités liées au secteur de la construction. La recherche consistait à améliorer ces modélisations. Pour cela, l'objectif était de développer une ACV-C dynamique de l'utilisation croissante du bois de structure pour les bâtiments non résidentiels. Elle s'appuie sur une AFM dynamique du bois. La thèse contribue à mieux nous éclairer sur le profil environnemental du bois de construction et des décisions qui l'accompagnent à l'échelle d'une région. Elle tient compte de la dimension du stock de bâtiment et elle combine des méthodes dynamiques pour considérer un inventaire, à l'échelle régionale, qui dépend du temps. Cet inventaire du cycle de vie comprend les conséquences d'une augmentation de la production, la substitution potentielle des matériaux, le stockage du carbone dans les produits du bois à longue durée de vie et à croissance lente, et les conséquences de fin de vie des structures. La construction NR au Québec a servi de cas d'étude car ce secteur a le potentiel d'augmenter sa consommation de bois de structure.

Le premier objectif consistait à modéliser les flux de matières au cours du temps afin de supporter l'identification et la modélisation des conséquences associées à l'utilisation croissante du bois dans les bâtiments non résidentiels. L'AFM a permis de faire une estimation du volume de bois dans les structures des nouveaux bâtiments NR. La principale source d'incertitude dans l'estimation du volume est l'interdépendance entre les paramètres du modèle. Cette incertitude engendre une grande différence entre les estimations d'utilisation maximale et minimale autour de la moyenne. La diminution de cette incertitude pourrait passer par davantage de recherches empiriques et de collecte de données. Cependant, l'AFM a aussi permis de montrer l'importance de l'incertitude maximale de l'estimation du volume récolté pour les nouvelles structures par rapport à la possibilité forestière et à la récolte totale des résineux. Dans le cas du potentiel d'utilisation maximal du bois dans les nouvelles structures NR, la récolte dédiée représente environ 5% de la récolte totale. Dans la mesure où la consommation du bois pour les autres marchés est constante, l'utilisation croissante pour les structures NR n'engendre pas

d'épuisement de la ressource locale. Cependant, l'hypothèse que les exportations suivent leur tendance conduit plus rapidement à la limite de la récolte totale possible (avant 2030). En effet, les exportations représentent 50%, la plus grosse part, de la récolte totale.

Le second objectif consistait à modéliser la substitution de matériaux de construction par les produits de structure en bois et à caractériser les impacts environnementaux des échanges entre le système étudié (secteur de la construction bois non résidentielle) et l'écosphère (l'environnement). La littérature présentait différentes façons de considérer la substitution de matériaux avec une approche attributionnelle pour l'impact sur le changement climatique, et la comparaison environnementale de bâtiments est difficilement extrapolable à grande échelle à cause de la variabilité des architectures non résidentielles. La modélisation effectuée a permis d'évaluer non seulement le déplacement d'impact sur le changement climatique, mais aussi sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. Les stratégies et politiques qui répondent à l'urgence climatique actuelle devraient également prêter attention à la qualité des écosystèmes. Le modèle peut présenter l'ampleur du déplacement des impacts en tenant compte de différentes conceptions de bâtiments et de catégories d'acier et de béton matériaux.

Puisque la création d'un stock de carbone peut permettre un bénéfice qui dépendra du devenir du stock, le troisième objectif consistait à considérer la séquestration temporaire du carbone dans un roulement de stock dynamique des structures en bois (de leur production à leur fin de vie). Pour cela, les modélisations dynamiques de la croissance des arbres après la récolte, de l'intensité carbone des matériaux substitués, du roulement de stock, de la fin de vie, et du facteur de caractérisation du CC sont combinés. La modélisation a donc montré l'influence de ces éléments. Pour le scénario de substitution de référence, la substitution de matériaux de construction (comme l'acier et le béton) est le principal contributeur à l'évitement d'impact au CC quel que soit la fin de vie des structures. Pour le scénario de substitution plus conservateur, la séquestration du CO₂ après la récolte permet l'évitement du forçage radiatif pendant la durée de vie du stock des bâtiments. En outre, cette partie traite également des indicateurs statiques et dynamiques du forçage radiatif et de l'équivalent CO₂ pour l'aide à la décision. Les résultats montrent que l'ACV statique classique surestime l'impact cumulé à long terme sur le changement climatique (tonne CO₂eq.) sans donner d'informations sur l'impact à court terme de l'étude de cas. Dans les études incluant des flux élémentaires avec des valeurs parfois positives et parfois négatives, l'approche statique peut conduire à des conclusions opposées à

celles de l'approche dynamique. Les indicateurs absous (forçage radiatif - W.m^{-2} - instantané ou cumulé) devraient être présentés avec l'indicateur relatif (tonne $\text{CO}_2\text{eq.année}0$). En effet, ces indicateurs dynamiques communiquent des informations différentes, mais complémentaires. Par conséquent, un décideur utilisant l'indicateur relatif dynamique (tonne $\text{CO}_2\text{eq.année}0$) devrait l'utiliser avec les métriques absous correspondantes.

7.2 Contributions

Ce projet de recherche apporte plusieurs contributions atteignant les trois objectifs spécifiques définis à la section 2.4.

- Estimation de l'utilisation croissante du bois dans la construction non résidentielle, élargissement d'AFM limitée par la disponibilité de données, et identification de conséquences sur la ressource d'une augmentation de production des structures en bois. Ces éléments répondent à l'objectif spécifique 1 et sont détaillés dans les 2 prochains paragraphes.

Les études se concentrent majoritairement sur les bâtiments résidentiels. Ceci est principalement dû à la disponibilité des données telles que l'intensité des matériaux en kg/m^2 et la surface moyenne dédiée à un habitant (m^2/hab). Peu de chercheurs se sont intéressés aux bâtiments NR à grande échelle. Par conséquent, la contribution revoit une méthodologie et ces paramètres pour améliorer l'estimation de l'utilisation des structures non résidentielles en bois. Elle peut aider à calibrer des estimations possibles avec d'autres méthodes. Enfin, elle peut contribuer à la réalisation d'une AFM où des données officielles ne couvrent ni les canaux de distribution individuels dans les différents secteurs ni les produits achetés par les consommateurs individuels. Elle peut contribuer à une ACV du bois de structure dans les bâtiments non résidentiels, à l'échelle régionale.

L'estimation et sa projection à un horizon temporel, associées à une AFM à l'échelle de la région, permettent un passage à la pratique de théories sur l'ACV-C. En effet, l'AFM a aidé à remonter la chaîne de production pour identifier les flux et voir si une augmentation de la production est possible sans limiter la disponibilité de la ressource. Cela permet d'identifier le fournisseur marginal potentiel non contraint par la ressource.

- L’élaboration de facteurs de substitution de matériaux pour un groupe de bâtiments non résidentiels applicable en ACV-C. Cet élément répond à l’objectif 2 et est détaillé dans le paragraphe suivant.

La substitution de matériaux est évaluée de différentes façons dans la littérature, avec une approche attributionnelle. Elle est soit modélisée pour un bâtiment spécifique soit pour une structure de bâtiment représentative. Le résultat va donc dépendre des frontières du système considérées pour le bâtiment ou la structure. Ce résultat est appelé facteur de substitution dans la littérature alors qu’il s’agit plutôt du résultat d’une comparaison. Il est aussi difficile d’en faire une extrapolation pour considérer un ordre de grandeur supérieur car ils ne peuvent pas être appliqués à d’autres cas d’études dont les frontières du système sont différentes. En effet, la grande variété d’architecture qui peut changer le résultat n’est pas considérée. De plus, ces effets d’ordre supérieur peuvent inclure des changements dans l’offre de ressources en fonction des limitations et des contraintes des fournisseurs. Enfin, le résultat de ces évaluations se concentre uniquement sur l’indicateur du CC. D’autres indicateurs environnementaux peuvent être défavorables au matériau qui contribue le moins au CC. Ces limitations ont motivé la présente contribution. Celle-ci réside dans l’élaboration de facteurs de substitution de matériaux (applicable en ACV-C) pour un groupe de bâtiments non résidentiels. Cela pour évaluer les conséquences environnementales de la pénétration des structures en bois qui substituent des matériaux de construction conventionnels à une résolution régionale.

- Mise en évidence de l’importance relative entre la substitution, les stratégies de fin de vie, et la séquestration temporaire du carbone. Cet élément répond à l’objectif 3 et est détaillé dans le paragraphe suivant.

En raison du stockage du carbone dans les produits du bois à longue durée de vie et à croissance lente, de leurs débouchés en fin de vie, et de la substitution potentielle des matériaux, il convient d’examiner les déplacements potentiels des GES lors de leur utilisation croissante à l’échelle d’une région. Pour une cohorte de bâtiments, le stockage du carbone dans la cohorte est temporel sur la durée de vie de la cohorte. Cependant, à la dimension de cohortes successives, le stockage du carbone est plus durable dans le temps pendant la durée de vie du stock. La création du stock avant que les premiers produits en bois ne soient disponibles en fin de vie pour de nouveaux débouchés, permet un bénéfice qui dépendra de ces débouchés. Le cumul du forçage radiatif

n'est pas étudié à cette échelle dans le cas d'une régénération forestière après la récolte. Pour cette échelle, la disponibilité et l'approvisionnement des ressources et des produits en fin de vie sont des questions qui peuvent être soulevées par l'AFM [12] et l'ACV-C [7], [73]–[75]. La combinaison de celles-ci met en évidence l'importance relative entre la substitution, les stratégies de fin de vie, et la séquestration temporaire dans un stock croissant.

7.3 Travaux futurs

Pour conclure, il serait important de travailler sur les perspectives de recherches suivantes :

- Il existe plusieurs méthodes pour estimer les quantités des matériaux dans les stocks bâtiments comme l'élaboration des indicateurs de composition des matériaux (kg/m^2) ou l'utilisation de statistiques économiques converties en volume ou masse avec des valeurs comptables. Cependant leurs résultats ne sont pas comparés entre eux. Cela permettrait de mieux comprendre leur représentativité et d'améliorer les AFM.
- Puisqu'une modification de l'offre et de la demande des produits en bois et de leurs substituts peut engendrer une modification des prix, les avantages des modèles économiques permettant de modéliser la réponse du marché doivent être exploités
- Les données disponibles sur la limite des récoltes autorisées permettent de comprendre que l'utilisation additionnelle du bois pour les structures ne pourrait pas contraindre la ressource. Cependant, les données ont été projetées selon la tendance. En considérant la répartition annuelle des précipitations, des changements de température potentiels, des changements dans les taux de décomposition, et d'autres risques accrus de perturbations naturelles extrêmes, la modélisation de la gestion forestière permettrait de combiner la gestion de la forêt avec la gestion du stock de bois dans l'environnement bâti. Le but pouvant être de voir comment maintenir un stock de bâtiment en bois par rapport à la gestion du stock forestier afin de maintenir le bénéfice de la séquestration quand l'utilisation du bois est maximale (plus de substitution possible). Puisque la séquestration est temporaire à l'échelle d'un bâtiment, peut-elle être considérée, en partie, constante à l'échelle d'une région qui peut renouveler son stock bâtiment en bois ?
- La littérature met en avant une comparaison entre l'augmentation des puits de carbone forestiers et la promotion du remplacement du bois [157]. Cependant, celle-ci n'a pas encore trouvé de consensus. La modélisation du carbone forestier, non seulement celui

qui est séquestré dans le tronc récolté mais aussi celui qui peut être absorbé et réémis par le sol, les feuilles et les arbres morts, pourrait être combinée avec l'ACV conséquentielle grâce à des modèles forestiers. Cela pourrait aider à trouver des réponses.

- Les pratiques courantes actuelles excluent l'impact climatique du changement indirect d'utilisation des terres, des aérosols, et le changement d'albédo [63], notamment pour les régions fréquemment enneigées [194]. Les travaux suivants de cette thèse pourraient aussi intégrer ces modélisations pour compléter les futures ACV-C dynamiques de l'utilisation croissante du bois.
- Comme le chapitre 4 l'a montré, les recherches se concentrent principalement sur les émissions de GES, les impacts sur la qualité des écosystèmes ne sont pas à négliger. La perte d'habitat peut être temporaire dans les exploitations forestières et différer selon la vitesse de croissance de la biomasse et la diversité biologique.
- Certains phénomènes naturels (ex. incendies, épidémies, chablis) peuvent causer des impacts (ex. émissions de carbone et perte d'habitat) selon la capacité de régénération de la forêt. Ces impacts pourraient être comparés à ceux de la récolte. Cela permettrait de comprendre le rôle de la récolte du bois de bonne qualité avant l'apparition des phénomènes naturels néfastes.
- Pour compléter les frontières du système, il devient important d'utiliser des modèles qui permettent plus de complexité dans la modélisation. Dans une même étude sur l'utilisation du bois dans les bâtiments, il n'y a pas d'intégration simultanée de modélisation de la gestion forestière selon les perturbations, de son effet d'albédo, du changement d'affectation des terres, de modélisation économique et conséquentielle, de modélisation du carbone biogénique et de la carbonatation du béton, de la dynamique du roulement de stock, et du recyclage en cascade en fonction du temps. Chacune de ces modélisations existe, mais les intégrer dans une même étude permettrait d'obtenir des résultats plus complets.
- Enfin, l'analyse d'incertitude permettrait de comprendre quels paramètres contribuent le plus aux incertitudes de la modélisation.

REFERENCES

- [1] Geskin Conseil, “Etude de marché sur l’utilisation potentielle du bois dans la construction non résidentielle au Québec,” 2008.
- [2] MRNF, “Stratégie d’utilisation du bois dans la construction au Québec,” Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) - Direction du développement de l’industrie des produits forestiers. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-52867-8 (Imprimé); ISBN 978-2-550-52869-2 (PDF), 2008.
- [3] MFFP, *La Charte du bois*. Québec, Qc, Canada: Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Gouvernement du Québec, 2017, p. 8.
- [4] MFFP, *Politique d’intégration du bois dans la construction*. Québec, Qc, Canada: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Gouvernement du Québec. Publication number : F33A-21/02. ISBN 978-2-550-88262-6 (imprimé); ISBN 978-2-550-88263-3 (PDF), 2020, p. 20.
- [5] ISO, “ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principe et cadre.” Organisation internationale de normalisation (ISO), Genève, 2006.
- [6] ISO, “ISO 14044 : Management environnemental - Exigences et lignes directrices.” Organisation internationale de normalisation (ISO), Genève, 2006.
- [7] B. P. Weidema, T. Ekvall, and R. Heijungs, “Guidelines for application of deepened and broadened LCA,” *Deliverable D18 of work package 5 of the CALCAS project*, no. 037075, p. 49, 2009.
- [8] A. Zamagni, J. Guinée, R. Heijungs, P. Masoni, and A. Raggi, “Lights and shadows in consequential LCA,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 17, no. 7, pp. 904–918, 2012.
- [9] J. M. Earles and A. Halog, “Consequential life cycle assessment: A review,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 16, no. 5, pp. 445–453, 2011.
- [10] R. N. Hansen, F. N. Rasmussen, M. Ryberg, and H. Birgisdottir, “Wood as a carbon mitigating building material: A review of consequential LCA and biogenic carbon characteristics,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 1078, no. 1, p. 012066.
- [11] M. Buyle, J. Braet, and A. Audenaert, “Life cycle assessment of an apartment building: Comparison of an attributional and consequential approach,” in *Energy Procedia*, 2014, vol. 62, pp. 132–140.
- [12] P. H. Brunner and H. Rechberger, *Practical Handbook of material flow analysis*. Taylor & Francis e-Library. LEWIS PUBLISHERS. ISBN 1566706041, 2004.
- [13] Z. Chen, H. H. Ngo, and W. Guo, “A critical review on sustainability assessment of recycled water schemes,” *Science of the Total Environment*, vol. 426, pp. 13–31, 2012.
- [14] M. A. Curran, M. Mann, and G. Norris, “Report on the international workshop on electricity data for life cycle inventories,” U.S. Environmental Protection Agency (EPA); National Renewable Energy Laboratory (NREL). EPA/600/R-02/041 (NTIS PB2003-

101303), Cincinnati, Ohio, USA, ISSN: 09596526, Oct. 2001.

- [15] A. K. Petersen and B. Solberg, "Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: A review of micro-level analyses from Norway and Sweden," *Forest Policy and Economics*, vol. 7, no. 3, pp. 249–259, 2005.
- [16] K. Milaj, A. Sinha, T. H. Miller, and J. A. Tokarczyk, "Environmental utility of wood substitution in commercial buildings using life-cycle analysis," *Wood and Fiber Science*, vol. 43, no. 3, p. 21, 2017.
- [17] A. Hafner and S. Schäfer, "Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level," *Journal of Cleaner Production*, vol. 167, pp. 630–642, Nov. 2017.
- [18] A. B. Robertson, F. C. F. Lam, and R. J. Cole, "A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete," *Buildings*, vol. 2, no. 3, pp. 245–270, Jul. 2012.
- [19] R. Sathre and J. O'Connor, "Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution," *Environmental Science and Policy*, vol. 13, no. 2, pp. 104–114, Apr. 2010.
- [20] C. E. Smyth, G. Rampley, T. C. Lemprière, O. Schwab, and W. A. Kurz, "Estimating product and energy substitution benefits in national-scale mitigation analyses for Canada," *GCB Bioenergy*, vol. 9, no. 6, pp. 1071–1084, 2017.
- [21] P. Leskinen *et al.*, *Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation*. From Science to Policy 7. European Forest Institute., 2018.
- [22] M. Köhl, H.-P. Ehrhart, M. Knauf, and P. R. Neupane, "A viable indicator approach for assessing sustainable forest management in terms of carbon emissions and removals," *Ecological Indicators*, vol. 111, p. 106057, Apr. 2020.
- [23] A. Buchanan, S. John, and S. Love, "Life cycle assessment and carbon footprint of multi-storey timber buildings compared with steel and concrete buildings," *NZ Journal of Forestry*, vol. 57, no. 4, pp. 9–18, 2013.
- [24] Y. Lessard, C. Anand, P. Blanchet, C. Frenette, and B. Amor, "LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 22, no. 5, pp. 1105–1116, Oct. 2018.
- [25] E. Hoxha, G. Habert, J. Chevalier, M. Bazzana, and R. Le Roy, "Method to analyse the contribution of material's sensitivity in buildings' environmental impact," *Journal of Cleaner Production*, vol. 66, pp. 54–64, Mar. 2014.
- [26] S. John, B. Nebel, N. Perez, and A. Buchanan, "Environmental Impacts of Multi-Storey Buildings Using Different Construction Materials," University of Canterbury, Christchurch (NZ), 2009.
- [27] F. Pierobon, M. Huang, K. Simonen, and I. Ganguly, "Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise non-residential construction: An LCA based comparative case study in the U.S. Pacific Northwest," *Journal of Building Engineering*, vol. 26, p. 100862, Nov. 2019.

- [28] G. Churkina *et al.*, “Buildings as a global carbon sink,” *nature sustainability*, vol. 3, pp. 269–276, 2020.
- [29] B. D’Amico, F. Pomponi, and J. Hart, “Global potential for material substitution in building construction: the case of cross laminated timber,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, p. 123487, Aug. 2020.
- [30] L. O. Eriksson *et al.*, “Climate change mitigation through increased wood use in the European construction sector—towards an integrated modelling framework,” *European Journal of Forest Research*, vol. 131, no. 1, pp. 131–144, Jan. 2012.
- [31] B. P. Weidema, N. Frees, and A.-M. Nielsen, “Marginal production technologies for life cycle inventories,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 4, no. 1, pp. 48–56, 1999.
- [32] Consequential-LCA, “By-products, recycling and waste,” *Consequential LCA > By-products, recycling and waste. Last updated: 2015-12-08. www.consequential-lca.org.*, 08-Dec-2015. [Online]. Available: <https://consequential-lca.org/clca/by-products-recycling-and-waste/>. [Accessed: 13-Nov-2022].
- [33] B. P. Weidema, “Market information in life cycle assessment,” 2.-0 LCA consultants; The Danish Environmental Protection Agency. Danish Ministry of the Environment, Environmental Project No. 863 2003, 2003.
- [34] M. Buyle, “Towards a structured consequential modelling approach for the construction sector: the Belgian case. A fairy tale on methodological choices in LCA,” University of Antwerp, 2018.
- [35] R. Frischknecht *et al.*, “LCA and decision making: when and how to use consequential LCA; 62nd LCA forum, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 9 September 2016,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, no. 2, pp. 296–301, 2017.
- [36] P. Nepal, K. E. Skog, D. B. McKeever, R. D. Bergman, K. L. Abt, and R. C. Abt, “Carbon Mitigation Impacts of Increased Softwood Lumber and Structural Panel Use for Nonresidential Construction in the United States,” *Forest Products Journal*, vol. 66, no. 1–2, pp. 77–87, 2016.
- [37] H. W. Kua and Y. Lu, “Environmental impacts of substituting tempered glass with polycarbonate in construction – An attributional and consequential life cycle perspective,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 910–921, Nov. 2016.
- [38] H. W. Kua and S. Kamath, “An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 81, pp. 190–200, Oct. 2014.
- [39] A. Ghose, M. Pizzol, and S. J. McLaren, “Consequential LCA modelling of building refurbishment in New Zealand - an evaluation of resource and waste management scenarios,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 119–133, Nov. 2017.
- [40] M. Buyle, J. Braet, A. Audenaert, and W. Debacker, “Strategies for optimizing the environmental profile of dwellings in a Belgian context: A consequential versus an attributional approach,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 173, pp. 235–244, Feb. 2018.

- [41] M. Buyle, W. Galle, W. Debacker, and A. Audenaert, “Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 218, pp. 141–156, May 2019.
- [42] A. M. I. Kallio, A. Moiseyev, and B. Solberg, “The Global Forest Sector Model EFI-GTM - The Model Structure,” European Forest Institute, Joensuu, Finland, EFI Internal Report 15, 2004.
- [43] J. Buongiorno, S. Zhu, D. Zhang, J. Turner, and D. Tomberlin, *The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications*. Elsevier. ISBN: 9780121413620, 2003.
- [44] K. Pingoud and A.-L. Perälä, “Arvioita puurakentamisen kasvihuonevaikutuksesta. 1. Skenaariotarkastelu potentiaalisesta puunkäytöstä ja sen kasvihuonevaikutuksesta vuosien 1990 ja 1994 uudisrakentamisessa. 2. Rakennuskannan puutuotteiden hilivaranto Suomessa: inventaariot vuosilta 19,” Espoo (Fi), 2000.
- [45] L. Gustavsson and R. Sathre, “Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials,” *Building and Environment*, vol. 41, no. 7, pp. 940–951, Jul. 2006.
- [46] B. P. Weidema, “Example - constraints on steel production - Consequential LCA,” *Consequential LCA > Marginal suppliers > Resource constraints on suppliers. Last updated: 2017-05-23. www.consequential-lca.org*, 23-May-2017. [Online]. Available: <https://consequential-lca.org/clca/marginal-suppliers/resource-constraints-on-suppliers/example-constraints-steel-production/>. [Accessed: 13-Aug-2020].
- [47] A. Geng, H. Yang, J. Chen, and Y. Hong, “Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation,” *Forest Policy and Economics*, vol. 85, no. 159, pp. 192–200, 2017.
- [48] J. H. Arehart, J. Hart, F. Pomponi, and B. D’Amico, “Carbon sequestration and storage in the built environment,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 1047–1063, Jul. 2021.
- [49] C. E. Andersen, F. N. Rasmussen, G. Habert, and H. Birgisdóttir, “Embodied GHG Emissions of Wooden Buildings - Challenges of Biogenic Carbon Accounting in Current LCA Methods,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 7, p. 120, Aug. 2021.
- [50] M. Head, A. Levasseur, R. Beauregard, and M. Margni, “Dynamic greenhouse gas life cycle inventory and impact profiles of wood used in Canadian buildings,” *Building and Environment*, vol. 173, p. 106751, Apr. 2020.
- [51] K. Negishi, L. Tiruta-Barna, N. Schiopu, A. Lebert, and J. Chevalier, “An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings,” *Building and Environment*, vol. 144, pp. 611–621, Oct. 2018.
- [52] K. Negishi, A. Lebert, D. Almeida, J. Chevalier, and L. Tiruta-Barna, “Evaluating climate change pathways through a building’s lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment,” *Building and Environment*, vol. 164, p. 106377, Oct. 2019.
- [53] S. Cordier, F. Robichaud, P. Blanchet, and B. Amor, “Enhancing consistency in

consequential life cycle inventory through material flow analysis,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 323, no. 1.

- [54] D. Peñaloza, M. Erlandsson, J. Berlin, M. Wålinder, and A. Falk, “Future scenarios for climate Mitigation of new construction in Sweden: Effects of different technological pathways,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 1025–1035, Jun. 2018.
- [55] P. Brunet-Navarro, H. Jochheim, G. Cardellini, K. Richter, and B. Muys, “Climate mitigation by energy and material substitution of wood products has an expiry date,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 303, p. 127026, Jun. 2021.
- [56] G. Kalt, “Carbon dynamics and GHG implications of increasing wood construction: long-term scenarios for residential buildings in Austria,” *Carbon Management*, vol. 9, no. 3, pp. 265–275, May 2018.
- [57] M. H. Ramage *et al.*, “The wood from the trees: The use of timber in construction,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 333–359, 2017.
- [58] F. Werner, R. Taverna, P. Hofer, E. Thürig, and E. Kaufmann, “National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment,” *Environmental Science and Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 72–85, 2010.
- [59] E. Hoxha *et al.*, “Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods,” *Buildings and Cities*, vol. 1, no. 1, pp. 504–524, Aug. 2020.
- [60] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, and R. Samson, “Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, no. 1, pp. 117–128, Feb. 2013.
- [61] V. Zieger, T. Lecompte, and A. Hellouin de Menibus, “Impact of GHGs temporal dynamics on the GWP assessment of building materials: A case study on bio-based and non-bio-based walls,” *Building and Environment*, vol. 185, p. 107210, Nov. 2020.
- [62] X. Wang, J. M. Padgett, F. B. De La Cruz, and M. A. Barlaz, “Wood Biodegradation in Laboratory-Scale Landfills,” *Environnemental Science and technologie*, vol. 45, pp. 6864–6871, 2011.
- [63] F. Røyne, D. Peñaloza, G. Sandin, J. Berlin, and M. Svanström, “Climate impact assessment in life cycle assessments of forest products: Implications of method choice for results and decision-making,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 116, pp. 90–99, Mar. 2016.
- [64] C. Breton, P. Blanchet, B. Amor, R. Beauregard, and W. S. Chang, “Assessing the climate change impacts of biogenic carbon in buildings: A critical review of two main dynamic approaches,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 6. MDPI, p. 2020, 14-Jun-2018.
- [65] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deshene, and R. Samson, “Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments,” *Environnemental Science and technologie*, vol. 44, no. 8, pp. 3169–3174, 2010.
- [66] F. Joos *et al.*, “Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) emission scenarios,” *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 15, no. 4, pp. 891–907, 2001.

- [67] IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.
- [68] M. U. F. Kirschbaum, “Climate-change impact potentials as an alternative to global warming potentials,” *Environmental Research Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 34014–34025, Mar. 2014.
- [69] L. Tiruta-Barna, “A climate goal-based, multicriteria method for system evaluation in life cycle assessment,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, no. 10, pp. 1913–1931, Oct. 2021.
- [70] F. Cherubini, G. P. Peters, T. Berntsen, A. H. Strømman, and E. Hertwich, “CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming,” *GCB Bioenergy*, vol. 3, no. 5, pp. 413–426, 2011.
- [71] D. Peñaloza, M. Erlandsson, and A. Falk, “Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings,” *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 219–226, Oct. 2016.
- [72] M. Fouquet *et al.*, “Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment,” *Building and Environment*, vol. 90, pp. 51–59, Aug. 2015.
- [73] E. Sevigné-Itoiz, C. M. Gasol, J. Rieradevall, and X. Gabarrell, “Methodology of supporting decision-making of waste management with material flow analysis (MFA) and consequential life cycle assessment (CLCA): Case study of waste paper recycling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 105, pp. 253–262, 2015.
- [74] E. Sevigné-Itoiz, C. M. Gasol, J. Rieradevall, and X. Gabarrell, “Environmental consequences of recycling aluminum old scrap in a global market,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 89, pp. 94–103, 2014.
- [75] E. Sevigné-Itoiz, C. M. Gasol, J. Rieradevall, and X. Gabarrell, “Contribution of plastic waste recovery to greenhouse gas (GHG) savings in Spain,” *Waste Management*, vol. 46, pp. 557–567, 2015.
- [76] F. Pittau, F. Krause, G. Lumia, and G. Habert, “Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls,” *Building and Environment*, vol. 129, pp. 117–129, Feb. 2018.
- [77] F. Pittau, G. Lumia, N. Heeren, G. Iannaccone, and G. Habert, “Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 214, pp. 365–376, Mar. 2019.
- [78] A. Levasseur *et al.*, “Valuing temporary carbon storage,” *Nature Climate Change*, vol. 2, no. 1. Nature Publishing Group, pp. 6–8, 11-Jan-2012.
- [79] D. Laner and H. Rechberger, “Chapter 7: Material Flow Analysis,” in *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment: Special Types of Life Cycle Assessment*, M. Finkbeiner, Ed. Berlin, Germany: Springer, 2016, pp. 293–232.
- [80] J. Parobek, H. Paluš, V. Kaputa, and M. Šupín, “Analysis of Wood Flows in Slovakia,” *BioResources*, vol. 9, no. 4, pp. 6453–6462, Sep. 2014.

- [81] U. Mantau, “Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 79, pp. 28–38, 2015.
- [82] V. Augiseau and S. Barles, “Studying construction materials flows and stock: A review,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 123, pp. 153–164, Aug. 2017.
- [83] V. Göswein, J. Krones, G. Celentano, J. E. Fernández, and G. Habert, “Embodied GHGs in a Fast Growing City: Looking at the Evolution of a Dwelling Stock using Structural Element Breakdown and Policy Scenarios,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 22, no. 6, pp. 1339–1351, Dec. 2017.
- [84] R. Ortlepp, K. Gruhler, and G. Schiller, “Material stocks in Germany’s non-domestic buildings: a new quantification method,” *Building Research & Information*, vol. 44, no. 8, pp. 840–862, Nov. 2015.
- [85] H. Bergsdal, H. Brattebø, R. A. Bohne, and D. B. Müller, “Dynamic material flow analysis for Norway’s dwelling stock,” *Building Research & Information*, vol. 35, no. 5, pp. 557–570, Oct. 2007.
- [86] T. Huang, F. Shi, H. Tanikawa, J. Fei, and J. Han, “Materials demand and environmental impact of buildings construction and demolition in China based on dynamic material flow analysis,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 72, pp. 91–101, 2013.
- [87] F. Shi, T. Huang, H. Tanikawa, J. Han, S. Hashimoto, and Y. Moriguchi, “Toward a Low Carbon-Dematerialization Society,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, no. 4, pp. 493–505, Aug. 2012.
- [88] C. Huang, J. Han, and W.-Q. Chen, “Changing patterns and determinants of infrastructures’ material stocks in Chinese cities,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 123, pp. 47–53, Aug. 2017.
- [89] T. Lichtensteiger and P. Baccini, “Exploration of urban stocks,” *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 18, no. 1, pp. 41–48, 2008.
- [90] L. Schebek *et al.*, “Material stocks of the non-residential building sector: the case of the Rhine-Main area,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 123, pp. 24–36, Aug. 2017.
- [91] H. Tanikawa and S. Hashimoto, “Urban stock over time: spatial material stock analysis using 4d-GIS,” *Building Research & Information*, vol. 37, no. 5–6, pp. 483–502, Nov. 2009.
- [92] D. Yang, J. Guo, L. Sun, F. Shi, J. Liu, and H. Tanikawa, “Urban buildings material intensity in China from 1949 to 2015,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 159, p. 104824, Aug. 2020.
- [93] N. Heeren and T. Fishman, “A database seed for a community-driven material intensity research platform,” *Scientific Data*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2019.
- [94] G. Schiller, A. Miatio, K. Gruhler, R. Ortlepp, C. Deilmann, and H. Tanikawa, “Transferability of Material Composition Indicators for Residential Buildings: A Conceptual Approach Based on a German-Japanese Comparison,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, no. 4, pp. 796–807, Aug. 2019.
- [95] C. Kayo, S. M. R. Dente, C. Aoki-Suzuki, D. Tanaka, S. Murakami, and S. Hashimoto,

- “Environmental Impact Assessment of Wood Use in Japan through 2050 Using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, no. 3, pp. 638–648, Apr. 2018.
- [96] E. Müller, L. M. Hilty, R. Widmer, M. Schluep, and M. Faulstich, “Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods,” *Environmental Science & Technology*, vol. 48, no. 4, pp. 2102–2113, 2014.
- [97] A. Gosselin, P. Blanchet, N. Lehoux, and Y. Cimon, “Main Motivations and Barriers for Using Wood in Multi-Story and Non-Residential Construction Projects,” *BioResources*, vol. 12, no. 1, pp. 546–570, 2017.
- [98] E. Hurmekoski, R. Jonsson, and T. Nord, “Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 99, pp. 181–196, Oct. 2015.
- [99] M. F. Laguarda-Mallo and O. Espinoza, “Awareness, perceptions and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 94, pp. 198–210, May 2015.
- [100] F. Robichaud, “Étude de marché pour les bois de structure dans la construction non résidentielle au Québec,” Québec, Qc, Ca, 2017.
- [101] O. Espinoza, V. Rodriguez Trujillo, M. F. Laguarda Mallo, and U. Buehlmann, “Cross-Laminated Timber: Status and Research Needs in Europe,” *BioResources*, vol. 11, no. 1, pp. 281–295, Nov. 2015.
- [102] J. Ratnasingam *et al.*, “Preference of Using Wood and Wood Products in the Construction Industry in Peninsular Malaysia,” *BioResources*, vol. 13, no. 3, pp. 5289–5302, May 2018.
- [103] M. F. Laguarda-Mallo and O. Espinoza, “Cross-laminated timber vs. concrete/steel: cost comparison using a case study,” in *World Conference on Timber Engineering, WCTE 2016*, 2016, p. 6.
- [104] V. Levée, G. Beaulieu, C. Dagenais, C. Frenette, A. Latulippe, and S. T. Bellavance, “ORIGINE: Écocondos de la pointe-aux-lièvres, Québec,” *Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas*. <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 32, Mar-2018.
- [105] P. Nepal, D. N. Wear, and K. E. Skog, “Net change in carbon emissions with increased wood energy use in the United States,” *GCB Bioenergy*, vol. 7, no. 4, pp. 820–835, 2015.
- [106] Statistics Canada, “Building Permits (BPER),” *Definitions, data sources and methods - Surveys and statistical programs*, 2019. [Online]. Available: <http://www23.statcan.gc.ca/imdb/p2SV.pl?Function=getSurvey&SDDS=2802>. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [107] Statistics Canada, “Archived - Investment in non-residential building construction, by type of building, province and census metropolitan area, inactive (x 1,000),” *Table: 34-10-0011-01, (formerly CANSIM 026-0016)*, 2018. [Online]. Available: https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=3410001101&request_locale=en. [Accessed: 09-May-2018].

- [108] Statistics Canada, “Building permits, by type of structure and type of work (x 1,000),” *Table: 34-10-0066-01, (formerly CANSIM 026-0021)*, 2019. [Online]. Available: https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/en/tv.action?pid=3410006601&request_locale=en. [Accessed: 01-Jun-2019].
- [109] Statistics Canada, “Building permits, January 2018,” *The Daily*, 2018. [Online]. Available: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/180308/dq180308a-eng.htm>. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [110] S. Beaucher, “Le siège social de Maheu&Maheu: Un premier mur vitré porteur en bois,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.*, Québec, Qc, Ca, p. 8, Mar-2014.
- [111] CECOBOIS, “L’immeuble à bureaux de GlaxoSmithKline,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.* <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 8, Mar-2012.
- [112] S. Beaucher, “Ameublements Tanguay de Trois-Rivières: La plus grande surface commerciale en bois d’ingénierie,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.* <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 8, Nov-2017.
- [113] S. Beaucher, C. Frenette, R. Poirier, and A. Latulippe, “Le CLSC Naskapi: Une construction efficace adaptée aux contraintes du Nord,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.* <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 8, Apr-2018.
- [114] CECOBOIS, “L’agrandissement du campus de l’UQAT à Rouyn-Noranda,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.* <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 8, Mar-2013.
- [115] S. Beaucher, “Centre multifonctionnel de Saint-Éphrem-de-Beauce Une construction tout en bois alliant beauté et économie,” *Centre d’expertise sur la construction commerciale en bois (CECOBOIS). Etudes de cas.* <https://cecobois.com/>, Québec, Qc, Ca, p. 8, Mar-2015.
- [116] C. Lamothe, “Catalogue confidentiel des coûts des bâtiments Québécois en bois,” Québec, Qc, Ca, 2015.
- [117] ISQ, “Mouvement de la population (population totale, naissance, décès, migration nette), Québec,” *Banque de données des statistiques officielles; Institut de la statistique du Québec (ISQ)*, 2018. [Online]. Available: http://www.bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken213_afich_tabl.page_tabl?p_iden_tran=REPER7K9G6C25-36616040552,6voe&p_lang=1&p_m_o=ISQ&p_id_ss_domn=986&p_id_raprt=695. [Accessed: 24-Oct-2018].
- [118] ISQ, “Perspectives démographiques du Québec et des régions, 2011-2061,” Institut de la statistique du Québec (ISQ). Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-71320-3 (version imprimée); ISBN 978-2-550-71321-0 (en ligne), 2014.
- [119] F. Ettwein *et al.*, *Future of the European Forest-Based Sector: Structural Changes Towards Bioeconomy*. Joensuu, Finland: European Forest Institut. ISBN 978-952-5980-

16-5 (printed) ISBN 978-952-5980-17-2 (pdf), 2014.

- [120] MFFP, “Statistiques forestières,” *Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Gouvernement du Québec. Publications liées à la transformation du bois > Collection statistiques et conjoncture - Ressources et industries forestières – Portrait statistique*, 2018. [Online]. Available: <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forêts/connaissances/statistiques-forestieres/>. [Accessed: 27-Feb-2019].
- [121] MRNFP, “La technologie du sciage et le rendement en bois d’œuvre résineux,” Bibliothèque nationale du Québec, Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs (MRNFP). Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, 2004.
- [122] Statistics Canada, “Building and demolition permits - Reporting guide,” *Definitions, data sources and methods - Questionnaires*, 2017. [Online]. Available: https://www.statcan.gc.ca/eng/statistical-programs/document/2802_D1_T1_V2. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [123] FEA, “Lumber Quarterly Forecast Service, January 2019, internal communication.,” Forest Economic Advisors (FEA), Littleton, MA, United States, 2019.
- [124] NFD, “National Forestry Database (NFD),” *Canadian Council of Forest Ministers (CCFM)*, 2018. [Online]. Available: <http://nfdp.ccfm.org/en/index.php>. [Accessed: 27-Sep-2018].
- [125] NRCAN, “Trade - Statistical data - Forests Resources,” *Natural Resources Canada (NRCAN)*, 2019. [Online]. Available: <https://cfs.nrcan.gc.ca/statsprofile/trade/qc>. [Accessed: 11-Jul-2019].
- [126] M. Ruschi Mendes Saade, G. Guest, and B. Amor, “Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence?,” *Building and Environment*, vol. 167. Elsevier Ltd, p. 106449, 01-Jan-2020.
- [127] J. L. Skullestad, R. A. Bohne, and J. Lohne, “High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives,” in *Energy Procedia*, 2016, vol. 96, pp. 112–123.
- [128] C. Scheuer, G. A. Keoleian, and P. Reppe, “Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications,” *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 10, pp. 1049–1064, May 2003.
- [129] Y. Dong *et al.*, “Comparative Whole Building Life Cycle Assessment of Energy Saving and Carbon Reduction Performance of Reinforced Concrete and Timber Stadiums—A Case Study in China,” *Sustainability*, vol. 12, no. 4, p. 1566, Feb. 2020.
- [130] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. P. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology.,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Apr. 2016.
- [131] O. Jolliet *et al.*, “IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 8, no. 6, pp. 324–330, 2003.
- [132] DDM, “Enquête 2013-2014 sur les coûts d’opération et les revenus liés au bois d’œuvre de l’industrie forestière du Québec. Rapport présenté au ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs,” Groupe-DDM Expert Conseil; Ministère des Forêts, de la Faune et des

Parcs (MFFP), Québec, Qc, Ca, Mar. 2016.

- [133] AFPQ, “TABLEAU SUR LES FACTEURS D’ÉQUIVALENCE,” *Agence Des Forêts Privées De Québec 03 (AFPQ 03)*, 2003. [Online]. Available: <http://afpq03.ca/wp-content/uploads/2014/06/EQUIVAL.pdf>. [Accessed: 01-Jun-2018].
- [134] AWC and CWC, “Environmental Product Declaration (EPD) North American Softwood Lumber - ISO 14025:2006, EN 15804, and ISO 21930:2017,” American Wood Council (AWC), Canadian Wood Council (CWC), Leesburg, US; Ottawa, Ca, 4788424634.102.1, 2018.
- [135] AWC and CWC, “Environmental Product Declaration (EPD) North American Glued Laminated Timber (glulam) - ISO 14025:2006, EN 15804, and ISO 21930:2017,” American Wood Council (AWC), Canadian Wood Council (CWC), Leesburg, US; Ottawa, Ca, 4788424634.104.1, 2018.
- [136] BIR, “World Steel Recycling in Figures 2015-2019. Steel Scrap - a Raw Material for Steelmaking,” Bureau of International Recycling (BIR) - Ferrous Division, Brussels. Be, 11th Edition, 2020.
- [137] UN, “World Population Prospects,” *United Nations (UN) - Population Division. Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics*, 2019. [Online]. Available: <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>. [Accessed: 30-Jul-2021].
- [138] WorldSteel, “Steel in buildings and infrastructure,” *World Steel Association. Steel markets - Buildings and infrastructure*, 2020. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/steel-topics/steel-markets/buildings-and-infrastructure/>. [Accessed: 27-Jul-2020].
- [139] ITA, “Global Steel Trade Monitor: Steel Imports Report: Canada - May 2020,” International Trade Administration (ITA), Washington D.C. U.S.A., 2020.
- [140] G. Bourgault, “Market for steel, unalloyed, low-alloyed and chromium steel 18/8, GLO, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Dubendorf, CH, 08-Feb-2019.
- [141] H. Azarijafari, A. Yahia, and B. Amor, “Removing Shadows from Consequential LCA through a Time-Dependent Modeling Approach: Policy-Making in the Road Pavement Sector,” *Environmental Science and Technology*, vol. 53, no. 3, pp. 1087–1097, Feb. 2019.
- [142] G. Martineau and L. Valsasina, “Concrete production 25 MPa, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 25-Apr-2019.
- [143] G. Martineau and L. Valsasina, “Concrete production 30-32 MPa, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 25-Apr-2019.
- [144] G. Martineau and L. Valsasina, “Concrete production 35 MPa, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 25-Apr-2019.
- [145] CSA, “CSA A23.1:19/CSA A23.2:19. Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d’essai et pratiques normalisées pour le béton.” Canadian Standards Association (CSA group). Licensed to/Autorisé à Université de Sherbrooke, 00000541,

Toronto, Canada, p. 932, Mar-2020.

- [146] S. Cordier, F. Robichaud, P. Blanchet, and B. Amor, “Exploring the regional-scale potential of the use of wood products in non-residential buildings: A building permits-based quantitative approach,” *BioResources*, vol. 15, no. 1, pp. 787–813, 2020.
- [147] NFD, “National Forestry Database (NFD),” *Canadian Council of Forest Ministers (CCFM)*, 2020. [Online]. Available: <http://nfdp.ccfm.org/en/index.php>. [Accessed: 18-Nov-2020].
- [148] MNRF, “Sustainable Growth: Ontario’s Forest Sector Strategy,” *Ministry of Natural Resources and Forestry (MNRF) of Ontario*, 2020. [Online]. Available: <https://www.ontario.ca/fr/page/croissance-durable-strategie-pour-le-secteur-forestier-de-lontario>. [Accessed: 18-Nov-2020].
- [149] MELCC, “Cible de réduction d’émissions de gaz à effet de serre du Québec pour 2030 – Document de consultation,” Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) - Direction des communications. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-74009-4 (imprimé); ISBN 978-2-550-73777-3 (pdf), 2015.
- [150] S. Humbert, A. De Schryver, X. Bengoa, M. Margni, and O. Jolliet, “IMPACT 2002+: User Guide. Draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis),” Lausanne, CH, 2014.
- [151] H. Imbeault-Tétreault, “Sawnwood, sawing, softwood, raw, CA-QC, Consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 17-Mar-2019.
- [152] A.-B. Laurent, “Sofwood forestry, Sawlog and veneer log, mixed species, boreal forest, measured as solid wood under bark, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Québec, Qc, Ca, 16-Jun-2019.
- [153] A. Amiri, J. Ottelin, J. Sorvari, and S. Junnila, “Cities as carbon sinks - Classification of wooden buildings,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 9, p. 094076, Sep. 2020.
- [154] MFFP, *Policy for the use of wood in construction*. Québec, Qc, Canada: Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Gouvernement du Québec. Publication number : F33A-21/02. ISBN 978-2-550-88705-8, 2020, p. 20.
- [155] G. Kalt, M. Höher, C. Lauk, F. Schipfer, and L. Kranzl, “Carbon accounting of material substitution with biomass: Case studies for Austria investigated with IPCC default and alternative approaches,” *Environmental Science and Policy*, vol. 64, pp. 155–163, Oct. 2016.
- [156] F. Cherubini, G. Guest, and A. H. Strømman, “Application of probability distributions to the modeling of biogenic CO₂ fluxes in life cycle assessment,” *GCB Bioenergy*, vol. 4, no. 6, pp. 784–798, Nov. 2012.
- [157] M. Schulte, R. Jonsson, T. Hammar, J. Stendahl, and P.-A. Hansson, “Nordic forest management towards climate change mitigation: time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects,” *European Journal of Forest Research*, no. 3, 2022.
- [158] T. Skytt, G. Englund, and B. G. Jonsson, “Climate mitigation forestry-temporal trade-

offs,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 11, p. 114037, Nov. 2021.

- [159] M. Matsumoto *et al.*, “Potential contributions of forestry and wood use to climate change mitigation in Japan,” *Journal of Forest Research*, vol. 21, no. 5, pp. 211–222, Oct. 2016.
- [160] R. Jonsson *et al.*, “Boosting the EU forest-based bioeconomy: Market, climate, and employment impacts,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 163, p. 120478, Feb. 2021.
- [161] L. Gustavsson, T. Nguyen, R. Sathre, and U. Y. A. Tettey, “Climate effects of forestry and substitution of concrete buildings and fossil energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 136, p. 110435, Feb. 2021.
- [162] H. Petersson *et al.*, “On the role of forests and the forest sector for climate change mitigation in Sweden,” *GCB Bioenergy*, vol. 14, no. 7, pp. 793–813, Jul. 2022.
- [163] S. Cordier, F. Robichaud, P. Blanchet, and B. Amor, “Regional environmental life cycle consequences of material substitutions: The case of increasing wood structures for non-residential buildings,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 328, no. 15, p. 129671, Dec. 2021.
- [164] Recyc-Québec, “Bilan 2018 de la gestion des matières résiduelles au Québec,” Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Recyc-Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-87044-9, 2020.
- [165] MFFP, “Compilation des données issues des registres forestiers 2018 _ Présentation faite à la Table de concertation sur le marché de la matière ligneuse. Mai 2019,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, 2019.
- [166] MFFP, “Compilation des données issues des registres forestiers 2017 _ Présentation faite à la Table de concertation sur le marché de la matière ligneuse. Juin 2018,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, 2018.
- [167] MFFP, “Compilation des données issues des registres forestiers 2020 _ Présentation faite à la Table de concertation sur le marché de la matière ligneuse. Juin 2021,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, 2021.
- [168] Consequential-LCA, “Recycling activities,” *Consequential LCA > By-products, recycling and waste. Last updated: 2017-05-22. www.consequential-lca.org*, 22-May-2017. [Online]. Available: <https://consequential-lca.org/clca/by-products-recycling-and-waste/recycling-activites/>. [Accessed: 23-Jul-2021].
- [169] MFFP, “Industrie des panneaux composites à base de bois : Produits et potentiel de marché en amérique du nord,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-81808-3 (PDF), 2018.
- [170] Athena Sustainable Materials Institute, “A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Particleboard-2013 Update Final Report,” Athena Sustainable Materials Institute; The Canadian Wood Council (CWC), Ottawa, On, Ca, 2013.
- [171] CRIQ, “Etude sur les produits pouvant être fabriqués à partir de bois de trituration de

- feuillus,” Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), FPInnovations, Ministère des ressources naturelles (MRN) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois, Québec, Qc, Ca, Dossier CRIQ 46123 Rapport final. ISBN 4186522227, 2013.
- [172] Consequential-LCA, “Not fully utilised by-product,” *Consequential LCA > By-products, recycling and waste*. Last updated: 2015-10-27. www.consequential-lca.org, 27-Oct-2015. [Online]. Available: <https://consequential-lca.org/clca/by-products-recycling-and-waste/not-fully-utilised-by-product/>. [Accessed: 23-Jul-2021].
- [173] P. Nazaret, “Bannissement du bois de l’élimination : Le cas du secteur CRD, des ICI, et des zones urbaines et municipales de l’Estrie,” Université de Sherbrooke (Québec, Canada), Université de Technologie de Troyes (France), 2013.
- [174] AGEKO, “F06 Cogénération AGRINOVA,” Groupe AGÉCO; Ministère des Affaires municipales et de l’Habitation (MAMH), Québec, Qc, Ca, F 06, 2009.
- [175] K. M. Strassmann, F. Joos, and G. Fischer, “Simulating effects of land use changes on carbon fluxes: Past contributions to atmospheric CO₂ increases and future commitments due to losses of terrestrial sink capacity,” *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, vol. 60, no. 4, pp. 583–603, 2008.
- [176] IEA and WBCSD, “Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry,” International Energy Agency (IEA), Cement Sustainability Initiative (CSI) of World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2018.
- [177] IEA, “Iron and Steel Technology Roadmap - Towards more sustainable steelmaking. Part of the Energy Technology Perspectives series,” International Energy Agency (IEA), 2020.
- [178] GCCA, “Concrete Future-Roadmap to Net Zero. The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete,” Global Cement and Concrete Association (GCCA), London, UK, version 0.1, 2021.
- [179] Z. Fan and S. J. Friedmann, “Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy,” *Joule*, vol. 5, no. 4, pp. 829–862, Apr. 2021.
- [180] IPCC, *Climate Change 2001: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2001.
- [181] U.S. Census Bureau, “Historical Population Change Data (1910-2020),” *Tables > Census.gov*, 26-Apr-2021. [Online]. Available: <https://www.census.gov/en.html>. [Accessed: 02-Aug-2023].
- [182] J. Vespa, L. Medina, and D. M. Armstrong, “Demographic Turning Points for the United States: Population Projections for 2020 to 2060. Population Estimates and Projections Current. Population Reports,” Feb-2020. [Online]. Available: <https://www.census.gov/content/dam/Census/library/publications/2020/demo/p25-1144.pdf>.
- [183] N. Heeren and S. Hellweg, “Tracking construction material over space and time: Prospective and geo-referenced modeling of building stocks and construction material flows,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 00, no. 0, 2016.

- [184] M. Brandão, B. P. Weidema, M. Martin, A. Cowie, L. Hamelin, and A. Zamagni, “Consequential Life Cycle Assessment: What, Why and How?,” *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, pp. 1–9, 2022.
- [185] Y. Yang and R. Heijungs, “On the use of different models for consequential life cycle assessment,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, no. 4, pp. 751–758, 2018.
- [186] D. Rajagopal, “A Step Towards a General Framework for Consequential Life Cycle Assessment,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, no. 2, pp. 261–271, 2017.
- [187] C. Gaudreault, T. B. Wigley, M. Margni, J. Verschuyt, K. Vice, and B. Titus, “Addressing biodiversity impacts of land use in life cycle assessment of forest biomass harvesting,” *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 5, no. 6, pp. 670–683, Nov. 2016.
- [188] A. L. Cowie *et al.*, “Applying a science-based systems perspective to dispel misconceptions about climate effects of forest bioenergy,” *GCB Bioenergy*, vol. 13, no. 8. John Wiley and Sons Inc, pp. 1210–1231, 01-Aug-2021.
- [189] J. Seppälä *et al.*, “Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels,” *Journal of Environmental Management*, vol. 247, pp. 580–587, Oct. 2019.
- [190] S. Soimakallio, T. Kalliokoski, A. Lehtonen, and O. Salminen, “On the trade-offs and synergies between forest carbon sequestration and substitution,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 26, no. 1, pp. 1–17, Mar. 2021.
- [191] P. Biber *et al.*, “Forest Biodiversity, Carbon Sequestration, and Wood Production: Modeling Synergies and Trade-Offs for Ten Forest Landscapes Across Europe,” *Frontiers in Ecology and Evolution*, vol. 8, p. 291, Oct. 2020.
- [192] E. Hurmekoski *et al.*, “Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 24, no. 4, pp. 899–912, Aug. 2020.
- [193] J. Liski *et al.*, “Carbon accumulation in Finland’s forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil,” *Annals of Forest Science*, vol. 63, no. 7, pp. 687–697, Oct. 2006.
- [194] F. Cherubini, R. M. Bright, and A. H. Strømman, “Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: Contributions from carbon fluxes and albedo dynamics,” *Environmental Research Letters*, vol. 7, no. 4, p. 11, Nov. 2012.
- [195] M. U. F. Kirschbaum, “Can trees buy time? An assessment of the role of vegetation sinks as part of the global carbon cycle,” *Climatic Change*, vol. 58, no. 1–2. Springer, pp. 47–71, May-2003.
- [196] M. U. F. Kirschbaum, “To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels,” in *Biomass and Bioenergy*, 2003, vol. 24, no. 4–5, pp. 297–310.
- [197] M. U. F. Kirschbaum, “Temporary carbon sequestration cannot prevent climate change,” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 11, no. 5–6, pp. 1151–

1164, Sep. 2006.

- [198] J. S. Fuglestvedt, T. K. Berntsen, O. Godal, R. Sausen, K. P. Shine, and T. Skodvin, “Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices,” *Climatic Change*, vol. 58, no. 3. Springer, pp. 267–331, Jun-2003.
- [199] K. Tanaka, G. P. Peters, and J. S. Fuglestvedt, “Policy Update: Multicomponent climate policy: why do emission metrics matter?,” *Carbon Management*, vol. 1, no. 2, pp. 191–197, Dec. 2010.
- [200] MDDEP, “Bannissement des matières organiques de l’élimination au Québec : état des lieux et prospectives,” Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et des Parcs (MDDEP) - Direction des matières résiduelles et des lieux contaminés, Service des matières résiduelles. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-64215-2, 2012.
- [201] Recyc-Québec, “Bilan 2021 de la gestion des matières résiduelles au Québec,” Bibliothèque et Archives nationales du Québec, Recyc-Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-94646-5, 2023.
- [202] J. A. Micales and K. E. Skog, “The decomposition of forest products in landfills,” *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 39, no. 2–3, pp. 145–158, Jan. 1997.
- [203] X. Tanguay, G. G. Essoua Essoua, and B. Amor, “Attributional and consequential life cycle assessments in a circular economy with integration of a quality indicator: A case study of cascading wood products,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 25, no. 6, pp. 1462–1473, Dec. 2021.
- [204] G. Geraud, E. P. Essoua, and M. A. Lavoie, “Etude de faisabilité technico-économique et empreinte carbone du recyclage du bois issu de la construction, rénovation et démolition (CRD),” FPInnovations. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP) Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC)., Québec, Qc, Ca, RAPPORT TECHNIQUE – 3, 2019.
- [205] CECOBOIS, “Revêtements structuraux,” *revetements-structuraux > produits-structuraux > produits*, 2023. [Online]. Available: <https://cecobois.com/produits/produits-structuraux/revetements-structuraux/#panneaux-osb>. [Accessed: 11-Aug-2023].
- [206] M. Ruschi Mendes Saade, A. Yahia, and B. Amor, “Is crushed concrete carbonation significant enough to be considered as a carbon mitigation strategy?,” *Environmental Research Letters*, vol. 17, no. 10, p. 104049, Oct. 2022.
- [207] MFFP, “Ressources et industries forestières du Québec - Portrait Statistique Édition 2017,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-81835-9 (PDF), 2018.
- [208] SOFiSTiK_AG, “finite element software.” 2016.
- [209] S. John, K. Mulligan, N. Perez, S. Love, and I. Page, “Cost, time and environmental impacts of the construction of the new Nelson Marlborough Institute of Technology -

Arts and Media building,” Christchurch, NZ, Research Report 2011-01, 2011.

- [210] Athena Sustainable Materials Institute, “Athena IE4B - version 5.1 build 01 hotfix.” Athena Impact Estimator For Buildings, Toronto, On, CA, 2015.
- [211] Athena Sustainable Materials Institute, “Software and database overview - V 5.0.0105.” Athena Impact Estimator For Buildings, Toronto, On, CA, 2014.
- [212] M. Puettmann, A. Sinha, and I. Ganguly, “CORRIM REPORT-Life Cycle Assessment of Cross Laminated Timbers Produced in Oregon,” Corvallis, OR, U.S., project no. WNZ-04162015-GE-Accession No. 1006435, 2018.
- [213] AWC and CWC, “Environmental Product Declaration (EPD) North American Laminated Veneer Lumber - ISO 14025:2006, EN 15804, and ISO 21930:2017,” American Wood Council (AWC), Canadian Wood Council (CWC), Leesburg, US; Ottawa, Ca, 4788424634.105.1, 2018.
- [214] Structurlam, “Environmental Product Declaration (EPD) CrossLamTM - ISO 14025 and ISO 21930 - valid until 2018,” Structurlam, 2013.
- [215] Athena Sustainable Materials Institute, “A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Glulam,” Athena Sustainable Materials Institute; The Canadian Wood Council (CWC), 2018.
- [216] G. Martineau and L. Valsasina, “Concrete production 50 MPa, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 25-Apr-2019.
- [217] G. Martineau and L. Valsasina, “Concrete production 20 MPa, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 25-Apr-2019.
- [218] Nordic Structures, “Fiche technique CCMC 13654-L, Nordic X-Lam,” *Nordic Structures*, 27-Feb-2012. [Online]. Available: https://www.nordic.ca/data/files/datasheet/file/13654_f.pdf.
- [219] SPFBSL, “Facteurs d’équivalence,” *Syndicat des producteurs forestiers du Bas-Saint-Laurent (SPFBSL)*, 2020. [Online]. Available: <https://www.spfbsl.com/mise-en-marche-collective/facteurs-equivalence>. [Accessed: 14-Jul-2020].
- [220] CWC, “Is there a list of glued-laminated timber (glulam) and cross-laminated timber (CLT) manufacturers in Canada?,” *The Canadian Wood Council (CWC)*, 2020. [Online]. Available: <https://cwc.ca/faq/is-there-a-list-of-glued-laminated-timber-glulam-and-cross-laminated-timber-clt-manufacturers-in-canada/>. [Accessed: 14-Jul-2020].
- [221] Element5, “Upgrades CLT Factory in Ripon, Quebec,” *Element5 Co.*, 25-Apr-2019. [Online]. Available: <https://elementfive.co/ripon-factory/>. [Accessed: 14-Jul-2020].
- [222] Element5, “Element5 to open Mass Timber Factory in St. Thomas, Ontario,” *Element5 Co.*, 29-Aug-2019. [Online]. Available: <https://elementfive.co/new-clt-plant/>. [Accessed: 14-Jul-2020].
- [223] P. Duchaine and L. Paradis Bolduc, “Constructions en bois lamellé-croisé, CLT cross laminated timber - Écohabitation,” *Écohabitation*, 06-Dec-2018. [Online]. Available: <https://www.ecohabitation.com/guides/1125/bois-massif-a-lhorizon-dans-la-construction-quebecoise/>. [Accessed: 14-Jul-2020].

- [224] Structurlam, “Fact Sheet,” *Structurlam Mass Timber Corporation*. [Online]. Available: <https://www.structurlam.com/external/press-kit/StructurlamPressKit-FactSheet.pdf>. [Accessed: 14-Jul-2020].
- [225] Structurlam, “Structurlam Mass Timber Corporation FAQs: New Manufacturing Plant in Conway, Arkansas,” *Structurlam Mass Timber Corporation*, p. 4, 09-Dec-2019.
- [226] H.-J. Althaus, “Steel production, unalloyed, converter, RoW, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Dübendorf, CH, p. 6, 01-Jan-2015.
- [227] ICTAB, “Contenu recyclé des produits en acier pour le bâtiment,” *Institut canadien de la tôle d’acier pour la bâtiment (ICTAB). Quelques mots sur la tôle d’acier - Facts 20*, 2005. [Online]. Available: www.cssbi.ca. [Accessed: 13-Aug-2020].
- [228] A. Javaid and E. Essadiqi, “Rapport Final sur la Gestion de la Ferraille, Le Tri et la Classification de l’acier,” Rapport no 2005-43(CF), 2006.
- [229] NRCAN, “Cahier d’information sur les minéraux et les métaux-2016,” Natural Resources Canada (NRCAN), N° de cat. M31-16F-PDF. ISSN 2371-3720, 2016.
- [230] H.-J. Althaus, “Steel production, reinforcing steel, RoW, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Dübendorf, CH, p. 3, 28-Jul-2010.
- [231] L. Valsasina, “Market for Concrete, 20, 25, 30-32, 35, 50 MPa, RNA, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Zurich, CH, 24-Apr-2019.
- [232] C. Reid and E. Moreno, “Production of Iron pellet, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 11-Apr-2015.
- [233] E. Moreno-Ruiz *et al.*, “Documentation of changes implemented in ecoinvent database v3.6,” Zürich, Switzerland, 2019.
- [234] H. Imbeault-Tétreault, “Market for Sawlog and veneer log, softwood, measured as solid wood under bark, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Montréal, Qc, Ca, 03-Sep-2015.
- [235] Athena Sustainable Materials Institute, “A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Eastern Canadian Surfaced Dry Softwood Lumber,” Athena Sustainable Materials Institute; The Canadian Wood Council (CWC), 2018.
- [236] CRIQ, “Débouchés pour les rebuts de bois de construction, rénovation, démolition (CRD) en dehors du Québec,” Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ), Recyc-Québec, Montréal, Qc, Ca, Dossier Client no 42922 Rapport technique no RT-42922-R1. ISBN 5148736542, 2011.
- [237] G. Caudron, “Concertation des acteurs de la filière du bois récupéré du secteur CRD: Rapport Final - Conclusions des rencontres,” SECOR, Regroupement des Récupérateurs et des Recycleurs de Matériaux de Construction et de Démolition de Québec (3R MDCQ), Recyc-Québec, 2011.
- [238] MDDELCC, “Lignes directrices sur l’industrie du sciage et des matériaux dérivés du bois,” Ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) - Direction générale des politiques de l’eau. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, 2015.

- [239] Gouvernement du Québec, *Q-2, r. 4.1 - Clean Air Regulation*. Quebec, Canada, 2021, p. 114.
- [240] Recyc-Québec, “Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD) - FICHE INFORMATIVE,” Recyc-Québec, Québec, Qc, Ca, 2018.
- [241] K. Treyer and P. Tirado, “Market for electricity, high voltage, CA-QC, consequential, ecoinvent database version 3.6.” Ecoinvent 3, Villigen, CH, 2016.
- [242] CER, “Canada’s Energy Future Data Appendices,” *Canada Energy Regulator (CER). Electricity Generation, Capacity, Primary Energy Demand, End - Use Demand*, 2017..
- [243] MFFP, “Ressources et industries forestières du Québec - Portrait Statistique Édition 2019,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-88077-6 (PDF), 2020.
- [244] MFFP, “Ressources et industries forestières du Québec - Portrait Statistique Édition 2018,” Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) - Direction du développement de l’industrie des produits du bois. Gouvernement du Québec, Québec, Qc, Ca, ISBN 978-2-550-84070-1 (PDF), 2019.
- [245] ArcelorMittal, “Objectif -33 % de CO₂ émis : ArcelorMittal présente ses projets de décarbonation à Agnès Pannier-Runacher, Ministre déléguée à l’Industrie, en visite sur le site de Dunkerque – ArcelorMittal en France,” *ArcelorMittal. Actualité*, 2020. [Online]. Available: <https://france.arcelormittal.com/news/2020/sept/arcelormittal-presente-ses-projets-de-decarbonation.aspx>. [Accessed: 17-Oct-2021].

ANNEXE A : Documents supplémentaires – chapitre 3

A.1 The building permits

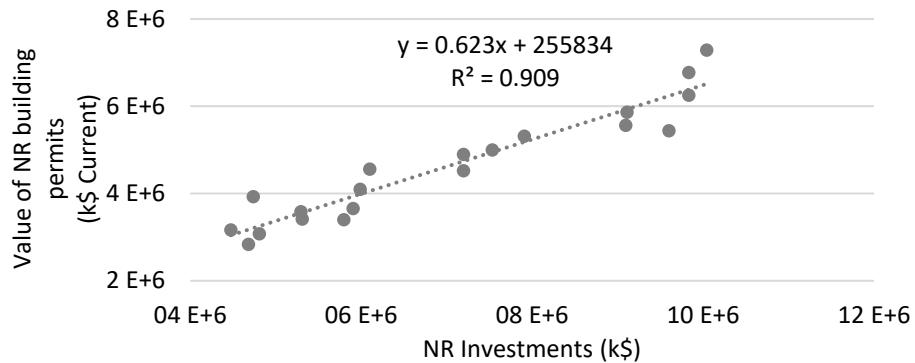


Figure A. 1 : Correlation (1997 to 2017) between the total building permits [108] and the Investments [107]

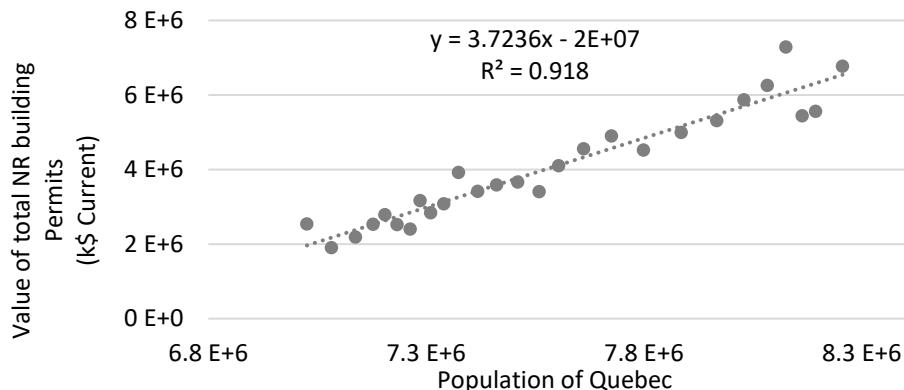


Figure A. 2 : Correlation (1991 to 2017) between the total building permits [108] and the population [117]

Thanks to the correlation between the historical data of population [117] and building permits, the authors used the existing projections of the population [118] to project the building permits according to three scenarios (minimum, average, and maximum). To do so, the total value of building permits (new constructions, alterations, improvements, additional structures, conversions, demolitions) follows Eq. A. 1 displayed by Figure A. 2. The total *BP* is only dependent on the population,

$$\text{Total } BP_i = \text{population}_i * 3.7236 - 2 * 10^7 \quad (\text{A. 1})$$

with i corresponding to the maximum, average or minimum scenario of the population projection. Then, the projection of the total value of building permits (new constructions, alterations, improvements, additional structures, conversions, demolitions) helped to project the *BP* for new constructions (Eq. A. 2). But, to extract the value of building permits for new constructions, the authors used the share of the total building permit which accounts for new building constructions (40.5% of the total) and additional structures to existing buildings (12.5%

of the total). The building permits for new building constructions and additional structures (Figure 3. 2) follow Eq. A. 2:

$$BP \text{ for new constructions}_i = (0.405 + 0.125) * (\text{population}_i * 3.7236 - 2 * 10^7) \quad (\text{A. 2})$$

A.2 Analysis of the average estimation

Table A. 1 : Effect of average value of parameters – From the value of building permits to the value of new NR building constructions

Scope of the objective	Building permits BP - Statistics Canada (2019)[108]		Share of new building constructions and additional structures		Value of new NR building constructions	
	\$	Comments	%	Comments	\$	Comments
All ICI	yes		yes		yes	
All stories	yes		yes		yes	
All new constructions	o.e.	It considers several types of works (new constructions, alterations, improvements, additional structures, conversions, demolitions).	yes	New permits of new constructions	Yes	In the “new constructions” category there are new construction, foundation, superstructure or part of a new building, mechanical, installation of a pre-fabricated building, additional value to previous permit(s). So, there will be still a bit over-estimation of the values of the new NR buildings.
Structure only	o.e.		o.e.		o.e.	
- Wood	yes		yes		yes	
- Other materials	yes		yes		yes	

o.e.: over-estimation

Table A. 2 : Effect of average value of parameters – From the value of new NR building constructions to the value of new NR structures

Scope of the objective	Value of new NR building constructions		Share of structure in the construction cost SCs (if all were in wood) - CECOBOIS (2012, 2013) [111], [114]; Beaucher (2014, 2015, and 2017) [110], [112], [115]; Beaucher <i>et al.</i> (2018) [113] and Lamothe (2015) [116]	Value of new NR structures		
	\$	Comments	%	Comments	\$	Comments
All ICI	yes		yes	There are few industrial buildings in the examples, but the ICI building permit shares are approximately 20% for industrials, 53% for commercials, and 27% for institutional (from 2000 to 2017) with a constant trend from 2000 to 2017 Statistics Canada (2019) [108].	yes	
All stories	yes	x	no (1 to 3)	The examples are for 1 to 3 stories, but it does not seem to depend on the number of stories only. The building cost and the structural cost can both depend on the number of stories, but the authors have too few examples to understand if the ratio of those costs is independent of the stories.	yes	Assuming it is independent of the stories.
All new constructions	yes		yes	Considers construction year > 2009. Does not seem to depend on time.	yes	
Structure only	o.e.		yes	Considers the ratio “wood structure cost” / “construction cost”.	yes	
- Wood	yes		yes	It considers the buildings with wood as the main structural element.	o.e.	o.e. if the wood structure is more expensive than other structural materials.
- Other materials	yes		no	Few other materials exist in the structures of the cases studies.		

o.e.: over-estimation

Table A. 3 : Effect of average value of parameters – From the value of new NR structures to the volume of wood in all new NR structures

Scope of the objective	Value of new NR structures		Structural cost per cubic meter of wood products WSp - CECOBOIS (2012, 2013) [111], [114]; Beaucher (2014, 2017) [110], [112]; and Beaucher <i>et al.</i> (2018) [113]		Cubic meter of wood products if applied to all new NR structures
	\$	Comments	\$/m³	Comments	
All ICI	yes		yes		yes
All stories	yes		no (1 to 3)	The examples are for 1 to 3 stories. It may be assumed this parameter depends on the number of stories (and the loads). With more stories, the load applications can be higher, implying a higher value (\$/m³). So, this parameter value can be under-estimated, implying an over-estimation of the cubic meter of wood products.	o.e. u.e. of the $(\$/m^3)^{-1}$ implying o.e. of the (m^3) .
All New constructions	yes	x	yes	Considers construction year > 2009. Does not seem to depend on time.	yes Assuming it is independent of the stories.
Structure only	yes		yes		yes
- Wood	o.e.		yes	Figures of examples consider only wood products.	o.e. It is like all the ICI structures were using wood.
- Other materials			no		

o.e.: over-estimation; u.e.: under-estimation

Table A. 4 : Effect of average value of parameters – From the volume of wood in all new NR structures to the volume of wood for a share of NR buildings

Scope of the objective	Cubic meter of wood products applied to all new NR structures		Share of wood building WBs - Robichaud (2017) [100]		Cubic meter of wood products applied to a share of new NR structures – Figure 3. 6	
	m ³	Comments	%	Comments	m ³	Comments
All ICI	yes		yes		yes	
All stories	o.e.		no (1 to 4)	Currently, the share of high-rise buildings with wood structure is less than the one for 1 to 4 stories. So, applying the value of 1 to 4 stories buildings for all the new buildings implies an over-estimation of the cubic meter.	o.e.	
All New constructions	yes		x yes	Considers recent buildings.	= yes	
Structure only	yes		Not all structural parts	The main structure and the roof frame (for buildings with 1 to 4 stories) have the highest share of wood than other structural elements (such as exterior and interior walls and other lightweight frames). So, applying the value of the main structure for all parts of the structure implies an over-estimation of the cubic meter.	o.e.	
- Wood	o.e.	It considers all the new ICI structures use the wood.	yes	This coefficient considers the current share of wood structures for new buildings.	yes	
- Other materials	No		yes		//	

o.e.: over-estimation

Table A. 5 : Effect of average value of parameters – From the volume of wood for a share of NR buildings to the harvesting

Scope of the objective	Cubic meter of wood products applied to a share of new NR structures – Figure 3. 6		% Comments	Yield processing - MFFP (2018) [120]	Cubic meter of harvesting	
	m ³	Comments			m ³	Comments
All ICI	yes		//		yes	
All stories	o.e.		//		o.e.	
All new Constructions	yes		yes	This parameter is a function of time.	yes	
Structure only	o.e.		x No (Sawn-wood only)	Not all the structures only use sawn-wood. Some structural wood panels can use destroyed or laminated roundwood. Almost all a roundwood serves at manufacturing those structural wood panels without producing by-products (chips and sawdust). It means that the overall equivalent yield processing for all the type of structural wood products is under-estimated. It implies an over-estimation of the required roundwood to harvest.	= o.e.	The under-estimation of the yield process implies an over-estimation of the required roundwood to harvest.
- Wood	yes		yes		yes	
- Other materials	//		//			

o.e.: over-estimation

A.3 Sensitivity analysis of the projections

A.3.1 Projections of the wood building share and the building permits

Both projections of the trend of the wood building share (*BP* – Figure A. 3 and Table A. 6) and the building permits (*WBs* - Figure A. 4 and Table A. 7) will result between the maximum and the minimum exploratory scenario.

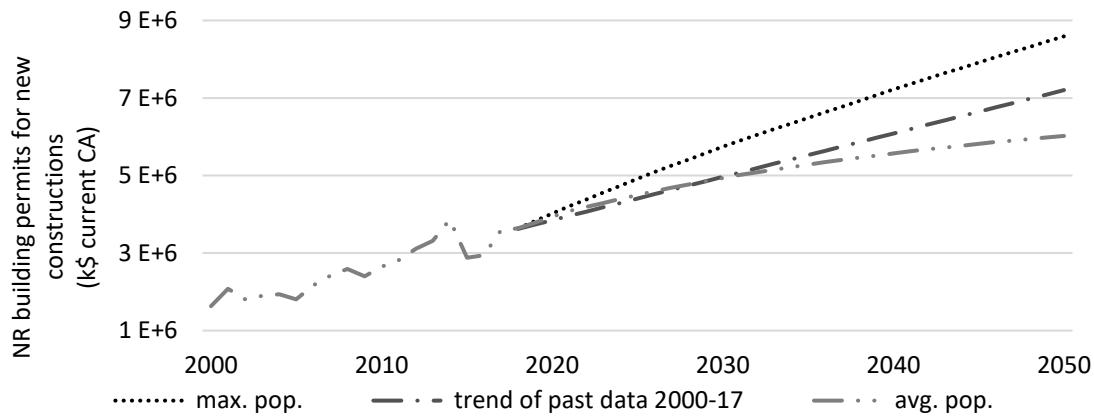


Figure A. 3 : Sensitivity of the building permits (BP) projections (value for the new buildings and the structural additions to existing buildings - 53 % of the total); Historical values: [108]

Table A. 6 : Effect of projection of the BP

2017	The projection of the BP (following its trend)	is changed by	+/- 0%	compared to the projection related to the population. Then, the result will change by	+/- 0%
2050			+/- 20%		+/- 20%

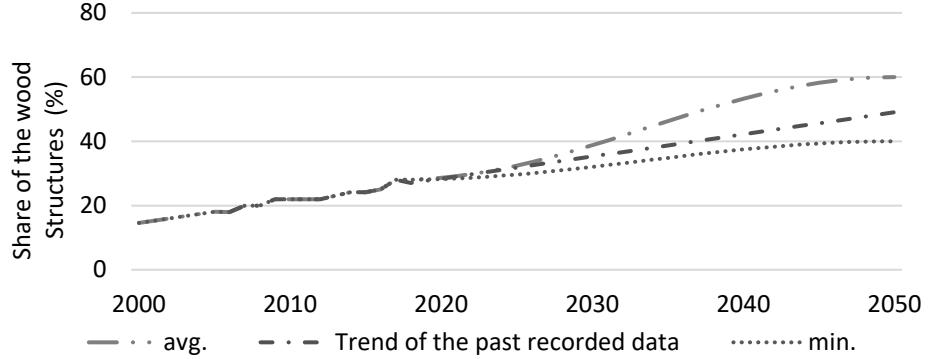


Figure A. 4 : Sensitivity of the share of building with wood structures (WBs) projections (Figure 3. 5 modified). Historical values: [100]; Projections: s-curve scenarios and historical trend

Table A. 7 : Effect of projection of the WBs

2017	The projection of the WBs (following its trend)	is changed by	+/- 4%	compared to the projection related to the population. Then, the result will change by	+/- 4%
2050			+/- 18%		+/- 18%

A.3.2 Projection of the sawmill processing yield

For the sawmill processing yield, whatever the used range of data for projecting the tendency is, there is no effect on the demand of roundwood to harvest at the first year of projection and the final time horizon. Indeed, both trends reach the limit yield before 2050 (Figure A. 5). However, it will result in different roundwood to harvest per sawnwood between the first and the final years.

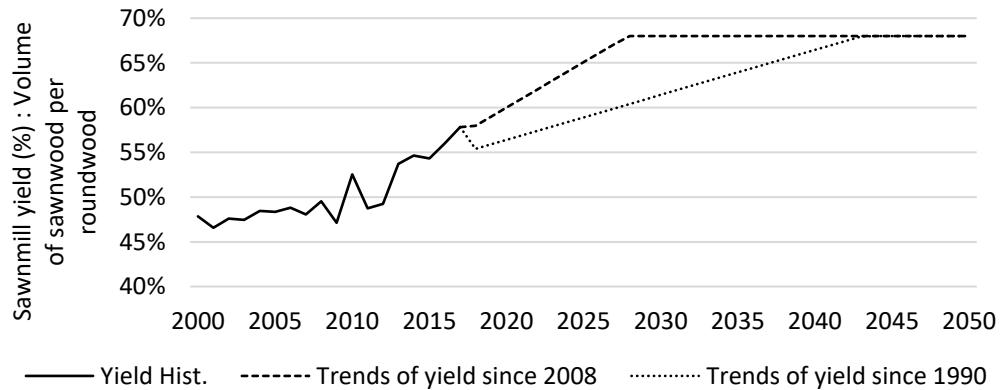


Figure A. 5 : Difference between the trends of sawmill yield since 1990 and 2008; Historical value of the sawnwood per roundwood elaborated from [120]

The historical values were estimated by doing the ratio between the statistics of sawnwood (mbf) and roundwood (10^3 m^3) and by converting the mbf in m^3 with the conversion factor (2.36 m^3/mbf) of the source of the statistics [207].

Figure A. 6 presents the sensitivity of the roundwood to harvest (ratio between the Figure A. 5 and the extreme scenarios of Figure 3. 8(a) - opposite changes). Indeed, the trend of the sawmill processing yield is not the same if the included data relates to the years from today to 2008 or

to 1990. Figure A. 6 shows that, for each scenario, the maximum difference between the curves with trends since 1990 and 2008 is around 11% in 2028.

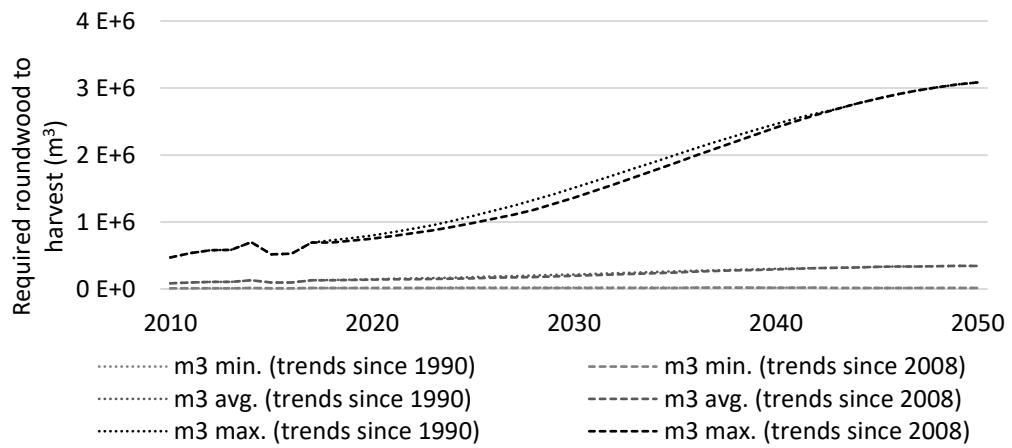


Figure A. 6 : Sensitivity of the roundwood to harvest for the new NR structures

ANNEXE B : Documents supplémentaires – chapitre 4

B.1 Methodology

B.1.1 Material substitution estimation

This section presents additional information (Figure B. 1, Table B. 1, and Table B. 2) on the substitution factors (sfi) that are developed (Table B. 3 and Figure B. 2).

Table B. 1 : References of the bill of materials

Based on data in	Type, function (# storey)	Reference of the material quantities (Engineering / Architectural study and other)
[18]	NR, typical mid-rise office (5)	Redesign of the concrete-framed building with timber elements. The redesign includes a functionally equivalent structural system and envelope according to existing feasible options (based on plan and elevation layouts of the original concrete building and also on Canadian Building Code requirements) [18].
[127]	NR, hotel (21)	The design of timber structures meets the same loading conditions as the benchmark structures according to the same footprint areas and building heights. Exclusion of any extra materials for heat insulation, sound insulation, etc. Flanking sound in timber structures may lead to some extra sound insulation in timber structures compared to concrete structures. Use of the Sofistik program [127], [208].
[23]	NR, arts and media building (3)	Architect and engineer groups who designed the original timber building also designed the concrete and steel alternatives [23], [209].
[26]	NR, simplified office (6)	The authors followed the New Zealand design codes and considered the moderate seismic zone. They used a template building to produce architectural and structural drawings for four alternative case studies. A local quantity surveying company (Davis Langdon Shipston Davies - Christchurch) calculated and provided the quantities of construction materials for each building design from the structural and architectural drawings [26].
[128] & [20]	R/NR, multi-use (6)	The design documents, contractor's records, interviews and manual on-site helped to provide a comprehensive and specific material inventory [128].
[24]	NR, office building (6)	There were plans and specifications of the industrial partner involved in the construction of the base-case scenario for missing data, the authors used technical specification sheets from manufacturers and literature. Finally, Athena's Impact Estimator for Building 5.1 software 2015 (Athena Sustainable Materials Institute) estimated amounts of materials for the rest. This approach also served as validation purposes for the was used for available quantities [24].
[129]	NR, stadium (n.a.)	The authors designed the equivalent timber building based on the reference concrete stadium (with the original construction drawings). The basic dimensions are the same as the reference concrete building and meet the local building regulations) [129].
[27]	NR, office building (8)	CLT and glulam replace the concrete frame in the structural gravity system according to the American Wood Council's National Design Specification for Wood Construction. The research team did not disclose the exact design requirements of the reference building. But the authors designed the buildings according to typical loading requirements for an office building in the Pacific Northwest. The required fire rating is assumed to be 2 hours. No consideration of aesthetics and acoustical performance [27].
[16]	NR, office building (2) NR, exercise facility (1.5) NR, sports center (2 +2 mezzanines) NR, medical building (1) NR, warehouse (1)	Structural engineers and facility managers provided the architectural and structural drawings of the buildings. The Athena IE4B [210] assembly input dialog helped to estimate the material quantities for both the original model and the comparison wood substitution model. For the structural system or material that could not be modeled in Athena IE4B, the authors performed a hand calculation of the corresponding quantities [16].

n.a.: not available; R: Residential; NR: Non-residential.

Table B. 2 : Characteristics of the case studies

Based on data in	Type, function (# storey)	Country	Wood products	Concrete products	Steel products	Building element	Assessment
[18]	NR, typical mid-rise office (5)	CA (B.C.)	CLT, glulam.	n.a.	No steel substitution	Primary shear walls & core, vertical load-bearing walls, above-grade floors & roof, above-grade columns, beams & roof parapet, wood sealer.	All impacts - TRACI
[127]	NR, hotel (21)	NO	CLT, glulam.	C25/30 & C35/45	Rebar steel	Slabs and walls (CLT), beams and trusses (glulam). Concrete basement for the required wind load resistance, concrete slab and friction piles.	Greenhouse gas emissions
[23]	NR, arts and media building (3)	NZ	LVL, other timber, plywood/MDF.	Conventional structural materials, pre-cast.	Reinforcing, sheet, and other structural steel.	Beams, columns, floor, internal linings and roof.	Global warming potential (GWP) and Primary energy
[26]	NR, simplified office (6)	NZ	LVL, MDF, other timber, plywood, western red cedar.	17.5 and 40 MPA, pre-cast.	Reinforcing, sheet, wire and other.	Internal and ground floor, internal and external facades, roof, posts, columns, beams shear wall, stairs.	GWP and primary energy
[128] & [20]	R/NR, multi-use (6)	US	Lumber, particleboard, plywood.	n.a.	n.a.	Structure, envelope, interior structure and finishes.	Carbon and energy substitution
[24]	NR, office building (6)	CA (Qc.)	n.a.	n.a.	n.a.	Primary & secondary structure.	All impacts - Impact 2002+
[129]	NR, stadium (//)	CN	Timber	Concrete, sand and cement.	n.a.	External wall and external window, roof, and ground floor.	Life cycle energy assessment (LCEA) and life cycle carbon assessment (LCCA)
[27]	NR, office building (8)	US	CLT, glulam.	n.a.	Connection and rebar steel.	Slabs, beams, columns, connections.	All impacts with TRACI and primary energy with the cumulative energy demand impact method
[16]	NR, office building (2)	US	I-joint, plywood, wood stud wall.	Cast-in-place concrete, concrete masonry units.	Steel studs and open-web steel joists.	Main structure including structural sheathing (OSB and plywood), foundations, floors, roofs, walls, stud wall, beams and columns. Insulation, cladding, surface finishes, membrane, acoustic tiles, door, window materials excluded.	GWP and impacts on energy sources, such as fossil fuel consumption with US EPA TRACI v2.1 [211]
	NR, exercise facility (1.5)		I-joint, plywood, LVL, PSL, lumber, light frame wood truss.				
	NR, sports center (2 +2 mezzanines)		I-joint, plywood, LVL, PSL, lumber, wood stud wall.				
	NR, medical building (1)		I-joint, plywood, glulam, lumber.	No concrete substitution			
	NR, warehouse (1)		OSB, LVL, PSL, lumber, light frame wood truss.				

n.a.: not available; R: Residential; NR: Non-residential; CLT: Cross-laminated timber; Glulam: Glued-laminated timber LVL: Laminated veneer lumber; PSL: Parallel-strand lumber; MDF: Medium-density fibreboard; OSB: Oriented strand board.

The non-residential case studies of the literature compare the steel and concrete frames (*jf*) to their equivalent wood frames (*wf*), and each frame can include concrete, steel, and wood products (Figure B. 1). So, it is important to notice that a building frame, made of a certain material, suggests that this material is the most used. The whole building structure is not only constructed with one material. Indeed, as a concrete frame or a steel frame can include wood components (e.g., roof framing, slabs, or wall), a wood frame can also include steel and concrete parts (e.g., in foundations, first floor, core walls around the elevator with reinforcing steel and steel beam). The material substitution factor (sf_{steel} or $sf_{concrete}$) shows the amount of steel or concrete that 1 tonne of wood structure can avoid (Figure B. 2). Below, Table B. 3 presents the material substitution factors (sf_{steel} and $sf_{concrete}$) for the non-residential buildings.

Table B. 3 : Material substitution factors in NR buildings

	Based on data in.	Type, function (# storey)	Δ tonne			$sf_{concrete}$	sf_{steel}
			concrete	wood	steel		
From concrete to wood frame	Robertson <i>et al.</i> (2012) [18]	NR, typical mid-rise office (5)	* -9,797.087	* +1,696.123	No steel substitution	5.78	0
	Skullestad <i>et al.</i> (2016) [127]	NR, Hotel (21)	* -14,934.612	* +2,655.003	-862.000	5.63	0.32
	Buchanan <i>et al.</i> (2013) [23]	NR, arts and media building (3)	Wood frame option 1 -672.000 Wood frame option 2 -672.000	+127.700 +127.700	-94.420 -94.420	5.26	0.74
	John <i>et al.</i> (2009) [26]	NR, simplified office (6)	Wood frame option 1 -3,966.000 Wood frame option 2 -3,966.000	+444.010 +615.310	-125.510 -125.510	8.93	0.28
	Scheuer <i>et al.</i> (2003) [128] & Smyth <i>et al.</i> (2017) [20]	R/NR, multi-use (6)	-1,194.000	+110.000	-153.000	10.85	1.39
	Lessard <i>et al.</i> (2018) [24]	NR, office building (6)	-7,470.000	+646.000	-133.850	11.56	0.21
	Dong <i>et al.</i> (2020) [129]	NR, stadium (//)	-7.104	+1.593	-0.215	4.46	0.13
	Pierobon <i>et al.</i> (2019) [27]	NR, office building (8)	Wood frame option 1 * -6,679.937 Wood frame option 2 * -6,679.937	* +966.786 * +1,595.599	-403.857 -402.641	6.91	0.42
	Milaj <i>et al.</i> (2017) [16]	NR, office building (2) NR, exercise facility (1.5) NR, sports center (2 + 2mezzanies)	-135.000 -557.000 -650.000	+40.000 +129.000 +174.000	-27.000 -138.000 -202.000	3.38	0.68
	Buchanan <i>et al.</i> (2013) [23]	NR, arts and media building (3)	Wood frame option 1 -35.000 Wood frame option 2 -35.000	+162.380 +161.500	-115.000 -115.000	0.216	0.708
From steel to wood frame	John <i>et al.</i> (2009) [26]	NR, simplified office (6)	Wood frame option 1 -964.000 Wood frame option 2 -964.000	+444.640 +615.940	-353.660 -353.660	2.168	0.795
	Milaj <i>et al.</i> (2017) [16]	NR, medical building (1)	No concrete substitution	+71.000	-56.000	1.565	0.574
		NR, warehouse (1)	No concrete substitution	+107.000	-73.000	0	0.68

n.a.: not available; R: Residential; NR: Non-residential; * Values in m^3 in the reference: converted from m^3 to kg.

Figure B. 1 presents how the substitution factor calculation is applicable generally.

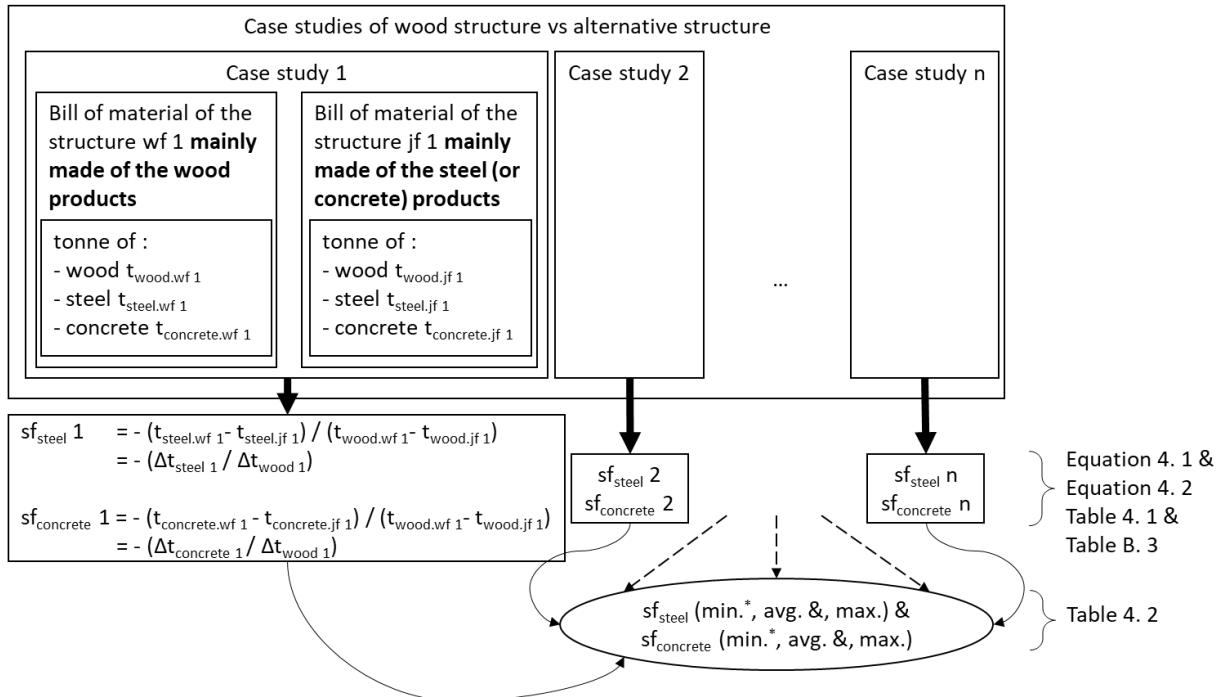


Figure B. 1 : Method for estimating the material substitution factors

Figure B. 2 presents the distribution of the sf_i that are calculated from the literature for the non-residential buildings. For the $sf_{concrete}$, the figure shows a difference in values between cases whose structure is mainly concrete and cases whose structure is mainly steel. This observation is not valid for the sf_{steel} .

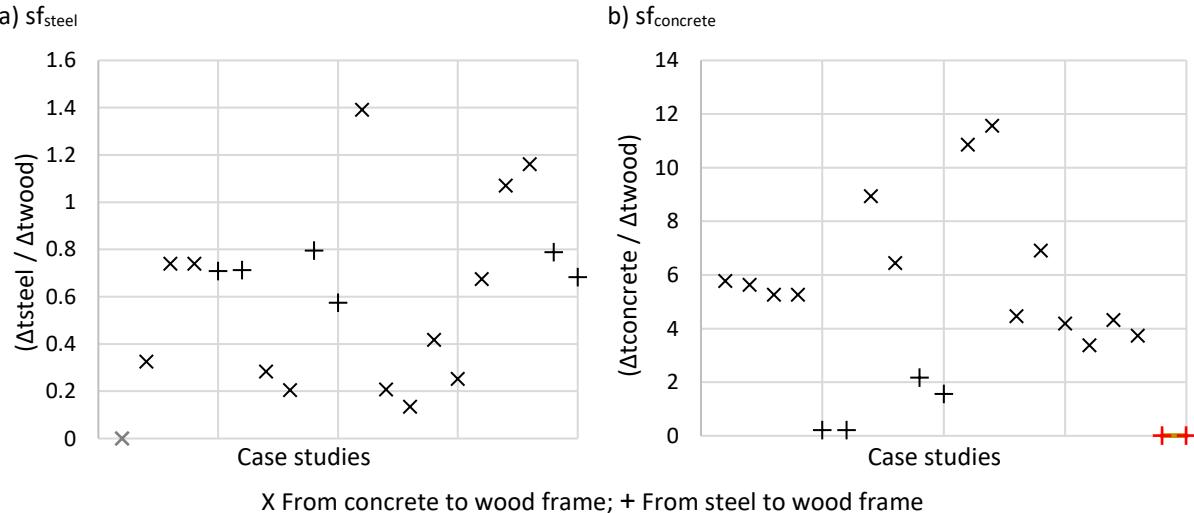


Figure B. 2 : Literature-based material substitution factors of NR buildings : a) sf_{steel} ; b) $sf_{concrete}$

Figure B. 3 displays a higher distribution for the $sf_{concrete}$ than for the sf_{steel} .

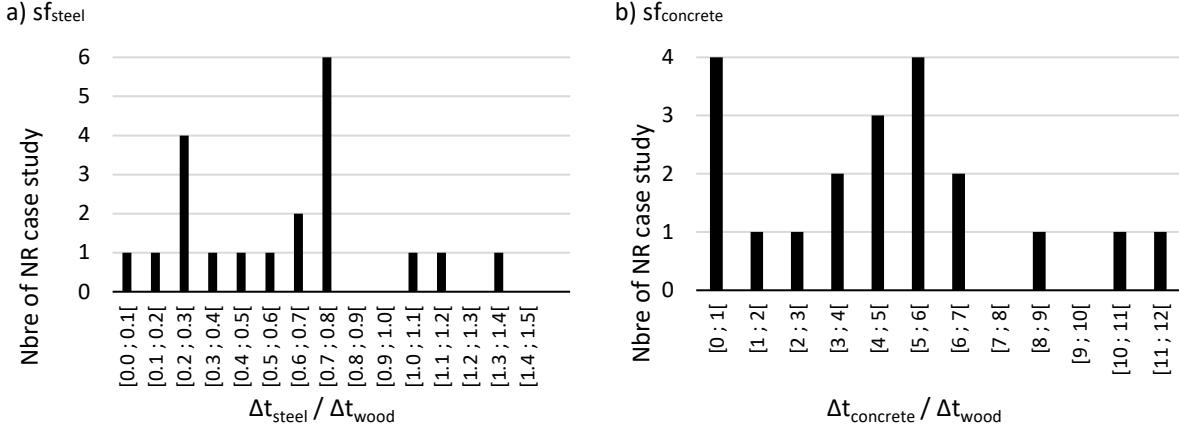


Figure B. 3 : Distribution of material substitution factors developed from the literature for NR buildings : a) sf_{steel} ; b) sf_{concrete}

With the amplitude of the distribution classes of 0.1 (Figure B. 3(a)), the maximum sf_{steel} represents 5% of the non-residential sample, the minimum sf_{steel} (0.13) represents 5%. With an amplitude of 1 (Figure B. 3(b)), the maximum sf_{concrete} represents 6% of the non-residential sample, the minimum sf_{concrete} (0.22) represents 11%. The sf_{steel} is mainly less than 1, and the sf_{concrete} is mainly greater than 1. When sf_{steel} is greater than 1, it can be explained as follows. In two cases, the use of buildings is for the practice of the sport. It requires the use of a large space. It also implies fewer walls and floors, and more beams than for buildings type with the same volume but different functions. The third one is a university building with several classrooms and open-plan offices. For the two cases where the sf_{concrete} is less than 1, it is a comparison of steel structures with some concrete parts compared to a wooden structure. Therefore, there is a little displacement of concrete compared to the added wood.

One should notice two important points of the data collection. 1) The sf_i can include aggregated data for the main structure and the envelope according to the transparency of the structure inventory [20], [23], [26], [128]. 2) Some case studies reported the three materials in different units (kg or m³) [18], [27], [127]. So, converting those data was necessary.

- 1) For some case studies, it was not possible to distinguish the share of steel and wood products that belong to the main structure or the envelope. To address this issue, the calculation of the material substitution factor includes all uncertain quantities of steel and wood products. For the minimum, average and maximum factors, the choice to incorporate those quantities in the sf_i calculation relies on a conservative approach for wood (Table B. 4). Indeed, this implies a smaller sf_i than it would be without (for the minimums, the averages, and the maximums). It means that less wood would be necessary to replace alternative materials, thus less avoided impact.
 - Failure to include the aggregated quantities of particleboard, medium-density fiberboard, and plywood in the sf_i calculation increases some of them by less than 15% over the inclusion of these quantities.
 - According to the case studies, excluding the quantities of steel sheets makes some parameters vary between -13% and +5%. The -13% drop neither affects the minimum nor the maximum sf_{steel} of the sample. The uncertainty on steel products does not affect the sf_{concrete} .

- According to the case studies, excluding the quantities of particleboard, medium-density fiberboard, plywood, and steel sheets in the calculation of the sf_i , makes it vary between -13.5% and +15%. However, compared to the inclusion, this implies that all the minimum, average, and maximum sf_i are higher (Table B. 4 and Table B. 5).

Table B. 4 : sf_i with and without the uncertain quantities

Wood (tonne)	a) sf_i with						b) sf_i without					
	sf_{steel}			sf_{concrete}			sf_{steel}			sf_{concrete}		
	min.	avg.	max.	min.	avg.	max.	min.	avg.	max.	min.	avg.	max.
1.00	0.13	0.59	1.39	0.22	4.54	11.56	0.13	0.60	1.59	0.22	4.67	12.44

Performing a sensitivity analysis of the sf_i regarding the consideration, or not, of those products is necessary to measure the potential underestimation of the material substitution (Table B. 5).

Table B. 5 : Relative changes of the sf_i between the inclusion and the exclusion of the uncertain quantities

	sf_i min.	sf_i avg.	sf_i max.	Relative change formulation
i = steel	+ 0.00%	+ 2.02%	+ 14.58%	=
i = concrete	+ 0.54%	+ 2.85%	+ 7.56%	$(sf_i \text{ without} - sf_i \text{ with}) / (sf_i \text{ with})$

- The inventory of some case studies [18], [27], [127] reported quantities in different units (kg or m³). If the density used by the case study was not available, the density used in the modelling was consistent with a conservative approach. Indeed, for a small value of sf_i , the approach is to use the maximum density of wood products and the minimum density of steel and concrete products (Table B. 6).

Table B. 6 : Density of wood and concrete products

CLT	Main framing timber	Product density – kg/m ³						
		Concrete						
		Glued laminated timber	LVL	20 MPa	25 MPa	35 MPa	30-32 MPa	50 MPa
544.68 [212]	548* [135]	548 [213]		2309*	2430	2315	2316	2332
420.48 [214]	467.3 [215]			Martineau and Valsasina (2019) [142]–[144], [216], 409 [18]		217]		
466 [27]	502 [27]							

*: values used in the modeling

One should notice two limitations: First, according to the case studies, the replacement of steel and concrete by wood also involved the replacement or addition of other structural or envelope materials. Therefore, a precise impact assessment should include the addition or avoidance of impacts related to these materials. However, the involvement of these other materials was not systematic across the case studies. It is part of the variability not considered. Secondly, the data

collection did not show a correlation between the steel substitution factor and the concrete substitution factor either with a predominantly concrete or steel structure. So, the combined use of both minimum steel and concrete substitution factors, which do not come from the same building example, is very conservative. Also, the combined use of both maximum substitution factors is very optimistic on the woodside. It contributes to further widening the upper and lower limits of the range of results.

B.1.2 Environmental impacts modeling

This section presents the environmental modeling of material supplies for the three scenarios and the sensitivity analyses. The ecoinvent 3.6 database [130] is used for the LCI.

Wood dataset

Regarding the wood products, the Quebec forest can supply NR structure with wood in the short-term. According to the conservative scenario with sawnwood exportations following its trend, softwood harvesting can reach the current sustainable supply limit of the forest [146]. To comply with this case, a scenario that considers supply from another Canadian region shows how results are sensitive to the location. Ontario (On) is an alternative scenario. However, the ecoinvent database lacks Ontario specific background data of wood products. Thus, the used wood processes are based on the original glued laminated timber of Quebec (Qc) with modification to better comply with a cross-laminated timber (CLT) made in Ontario.

Harvesting - Sawlog and veneer log, logging

The harvesting process of Quebec is the more impacting process of the sawlogs and veneer logs in the database (Figure B. 4). For the Ontario scenario, the harvesting process doesn't exist. So, to complies with a conservative approach on wood regarding other material structures, the Quebec process serves as a proxy for harvesting in Ontario. There was no possible change in the Quebec harvesting process to adapt it for Ontario harvesting because of the lack of data for this region. The more impacting inputs are the elementary flow of the activity and the diesel input (burned in building machine).

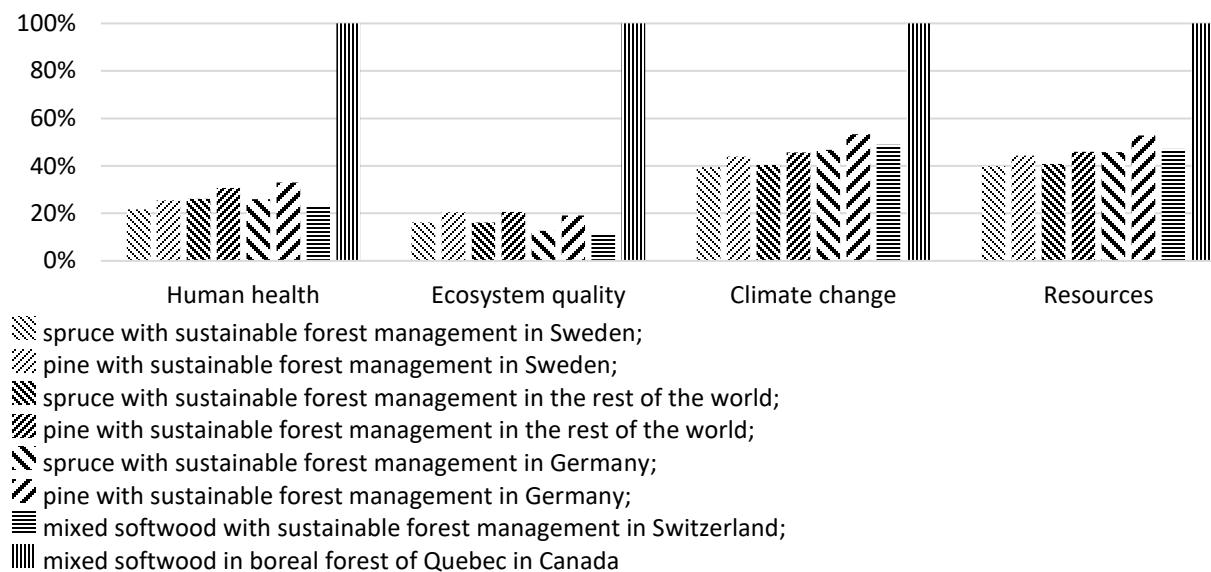


Figure B. 4 : Relative impacts of the production of Sawlog and veneer log (softwood); from ecoinvent 3 [130] and Impact2002+ [131]

Sawmill - Sawnwood, sawing, air/kiln drying, planing

To adapt the sawing process of Quebec to the Ontario context, the electricity mix of Ontario replaced the electricity mix input of Quebec in the stages of sawing, drying, and planing.

The landfarming treatment of the wood ash mixture in Quebec (output of the kiln drying process) replaced that of the rest of the world for the Quebec context. It implies more impact of the adjusted Quebec kiln drying (Table B. 7). The landfarming treatment of wood ash mixture in Ontario uses the treatment of the rest of the world.

Table B. 7 : Impacts of landfarming 1 kg of wood ash mixture; from ecoinvent 3 [130] and Impact2002+ [131]

Impact indicator	Unit	Treatment of wood ash mixture, in landfarming	
		Rest of the world	Quebec - CA
Human health	DALY	2.50 E-05	2.51 E-05
Ecosystem quality	PDF*m ² *yr	221.48	221.48
Climate change	kg CO ₂ eq.	1.34 E-03	3.52 E-03
Resources	MJ primary	19 E-03	51.4 E-03

The processes that use heat production with natural gas and other than natural in the sawmill are the ones of the Quebec context for the Quebec and the Ontario sawing. The reason is that there is no gas heat production process for Ontario and because the one of Quebec is either more impacting for the human health and ecosystem quality indicators or less than 4% impacting (Table B. 8).

Table B. 8 : Impacts of 1 MJ heat production, district or industrial; from ecoinvent 3 [130] and Impact2002+ [131]

Impact indicator	Unit	Impacts of market for 1 MW heat production with natural gas		Heat, district or industrial		Impacts of 1 MW heat production with heavy fuel oil at industrial furnace	
		Rest of the world	Quebec - CA	Rest of the world	Quebec - CA	Rest of the world	Quebec - CA
Human health	DALY	-1.21 E-07	3.04 E-08	2.39 E-08	2.32 E-08	5.52 E-08	5.42 E-08
Ecosystem quality	PDF*m ² *year	-1.52 E-02	2.81 E-03	2.06 E-02	2.05 E-02	1.08 E-02	1.06 E-02
Climate change	kg CO ₂ eq.	7.88 E-02	7.57 E-02	9.06 E-02	8.95 E-02	9.36 E-02	9.23 E-02
Resources	MJ primary		1.36	1.30	1.33	1.31	1.28
							1.26

Massive panel manufacturing

The process of Glued Laminated Timber in Quebec serves as a proxy for a CLT since they both require softwood lumber boards that are glued together on top of each other. To better comply with a CLT produced in Quebec or Ontario, the authors changed some input processes such as the sawnwood (presented above) and the adhesive. Among the glulam process, the proxy of the adhesive (polyurethane, rigid foam) is one of the largest contributors (between 20 and 40% of the impacts for three indicators: human health, climate change, and resources). The authors adjusted it to better comply with a CLT produced by a local producer [218]. The adhesive production occurs in Rocky Hill, Connecticut (USA). Therefore, the electricity used in the manufacture of the adhesive involves the U.S. energy mix. The transportation distances correspond to the distances between Rocky Hill and St Mary's (884 km for the Ontario case) and between Rocky Hill and Chibougamau (1186 km for the Quebec case). As a result, the CLT process involves more impact than the original glulam. And, among the structural wood products, it has the highest impact on climate change and ecosystem quality. For the indicators of human health and resource impacts, this is the second most impactful with a difference of 7% and 3% from the most one (Figure B. 5). The figure shows plywood with a relatively negative impact on climate change and human health indicators compared to other wood products. This is due to the co-production of wood chips. Wood chips are used to produce heat instead of using hard coal, lignite, or wood chips directly from forests. Indeed, wood chips replace energy sources that may have a greater contribution to climate change and human health indicators.

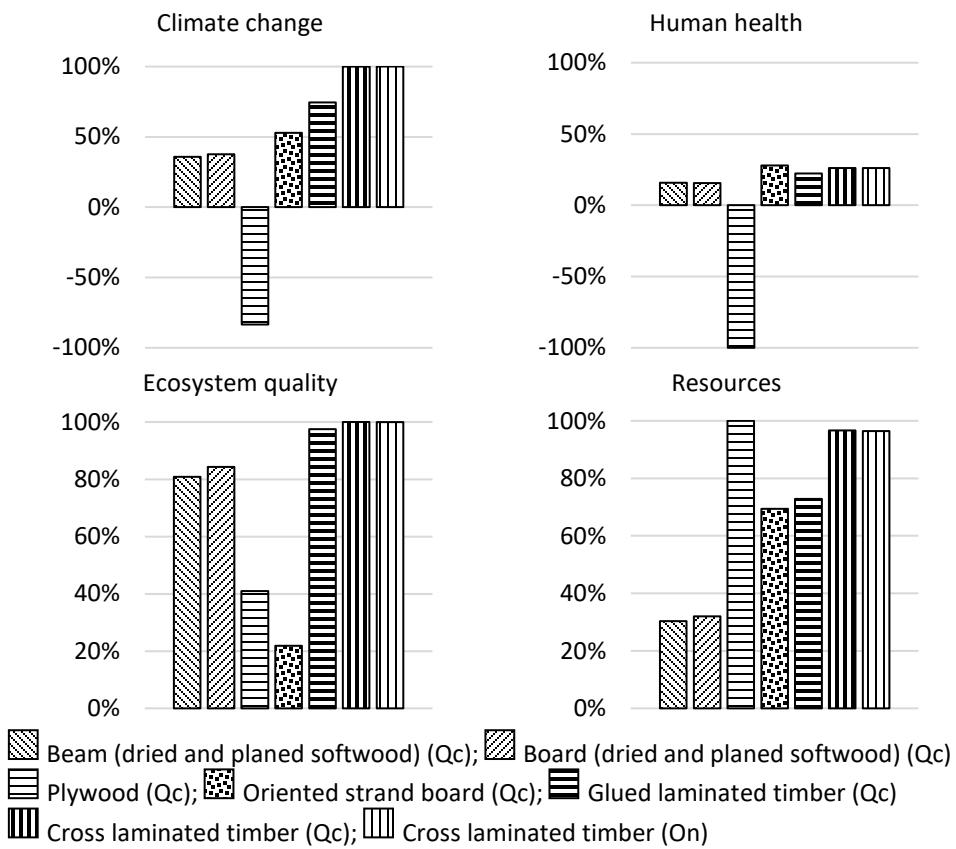


Figure B. 5 : Relative impacts of the production of wood products in Quebec (Qc) or Ontario (On)

Transport from forest to sawmill

The transportation value (tkm) of the sawlog from the forest to the mill is adjusted. Several values are available in the literature. Therefore, to keep a conservative approach, the highest distance is selected. This distance, from the forest to the mill, is 140.5 km [132]. The cubic meter of wet softwood roundwood under bark is converted into 0.870 wet metric tonne [133], [219]. The corresponding amount of bark (around 11.39% of the roundwood, i.e. 0.129 m³) is also converted into a wet metric tonne and added to the transported mass (0.111752 wet metric tonne).

Transport from sawmill to a massive panel plant

After sawmilling, the transport from the sawmill to the massive timber manufacturing is necessary. CLT manufacturing, and other massive timbers, are possible in Quebec and Ontario (Table B. 9). The highest distance between a sawmill and a massive panel plant is selected. This distance is 1118km (sawmill at Percé in Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine and mass timber factories at Ripon in Outaouais). The cubic meter of dry sawnwood is converted into 0.460 anhydrous metric tonne [134].

Table B. 9 : List of Canadian cross laminated plant

CLT manufacturing plant [220]	Location	Capacity.m³
Element5	Ripon, CA-Qc	*10,000 [221]
Nordic Engineered Wood Products	St Thomas, CA-On	*45,000 [222]
Structurlam Wood Products Ltd.	Chibougamau, CA-Qc	80,000 [223]
Guardian Structures	Okanagan-Similkameen C, Oliver and, Penticton in CA-BC and Conway in US - Arkansas (opening June 2021) [224]	33,980 Conway [225]
	St Mary's, CA-On	//

* Expected capacity in the coming years

Transport from a massive panel plant to a construction site

The available distance (1107 km) in the literature is selected [132]. A summary of the transportation distances is available in the following tables (Table B. 13, Table B. 14, and Table B. 15).

Sensitivity analysis about the supplying and the manufacturing location

Finally, Figure B. 6 presents the relative difference in the supply of 1 m³ of wood product to the construction site from Quebec or Ontario. It shows the difference is not significant because whatever the indicator is, it is less than 1%. It means that if all the supply comes from Quebec or if some of it comes from Ontario, the difference calculated in the results will not be important either.

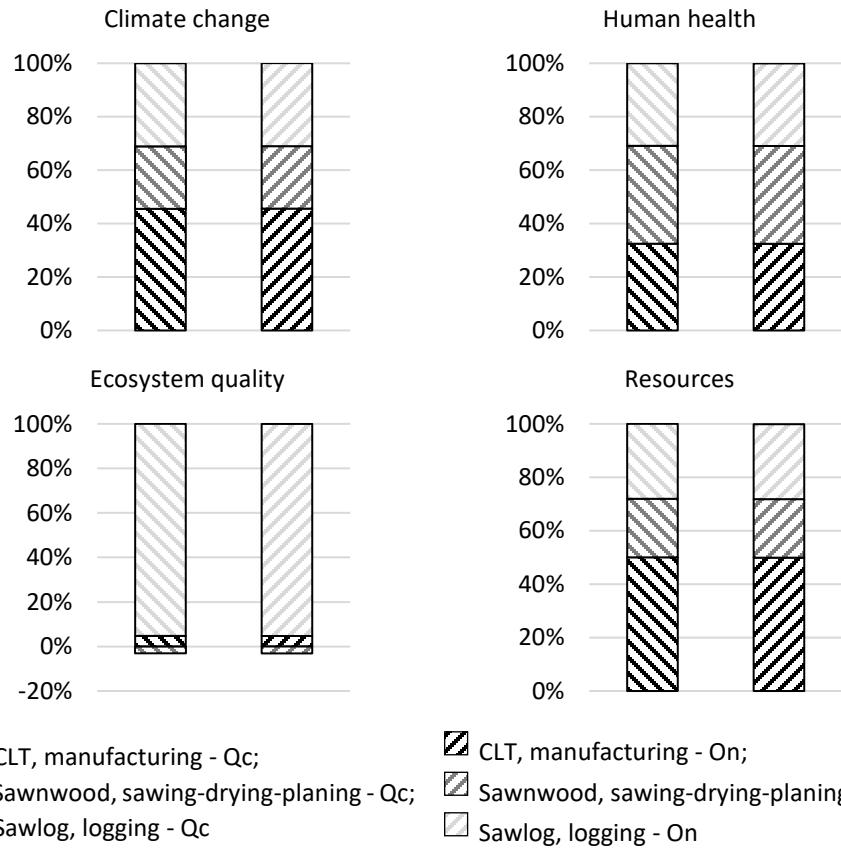


Figure B. 6 : Relative impacts of the supply of wood products to the construction site from Quebec (Qc) or Ontario (On)

Steel dataset

Steel grades

Steel can follow two routes, the blast furnace-basic oxygen furnace route (BF-BOF) or electric arc furnace (EAF). The first one produces steel from ore and around 10-25% of iron scrap. The second one produces steel from around 95% of steel scrap [226], [227]. Buildings use both primary steel (from BF-BOF) and secondary steel (from EAF). However, in the consequential approach, secondary steel is considered as a limited raw material because its production depends on other sources. Indeed, secondary steel depends on the availability of new scrap (via post-production of steel) and old scrap (via post-use of steel products) [46]. Moreover, steel scrap is fully utilized with an increasing trend in demand and production of Canada and the rest of the world [136], [228], [229]. It implies that a change in the demand for steel in buildings will not affect the secondary steel production but the primary steel [46]. Indeed, even if wood can substitute primary and secondary steel in buildings, the avoided secondary steel buildings can be used in other markets to replace primary steel. Moreover, the EAF process presented higher impacts than BOF production. For specific grades and shapes of steel products, the authors used a mixture of these products. For shape, these are structural shapes (25% of the steel used in buildings), reinforcing bars (44%), and plates (31%) [138]. In terms of grade, the authors applied the ecoinvent process with the largest, smallest, and medium impact on each of the steel forms (Table B. 10). The reinforcing steel is a hot rolled low alloy (37%) and unalloyed (63%) steel [230].

Table B. 10 : Steel product compositions

Structural steel mix modeling in ecoinvent			WorldSteel (2020) [138]	
min.	avg.	max.		
Unalloyed steel, hot rolled	Low-alloyed steel, hot rolled	Chromium steel 18/8, hot rolled	Structural sections	25%
Reinforcing steel*	Reinforcing steel*	Reinforcing steel*	Reinforcing bars	44%
Unalloyed steel, sheet rolled	Low-alloyed steel, sheet rolled	Chromium steel 18/8, sheet rolled	Sheet products	31%

*37% low-alloyed and 63% unalloyed [230]

Figure B. 7 presents the relative impacts of the structural steels in the assessment.

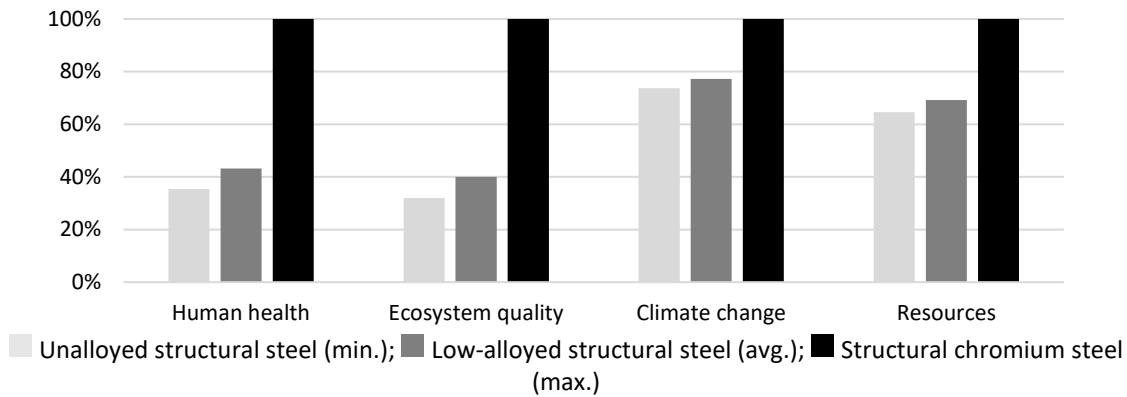


Figure B. 7 : Relative impacts of the supply of the structural steels in the world

Sensitivity analysis about the supplying and the manufacturing location

Since an assumption concerned the origin of steel, the sensitivity analysis looks for variations in impacts between the results of the Canadian steel model and the world average. The ecoinvent processes of global steel (crude steel and steel forming) served to model Canadian steel. To do this, the average of the global electricity mix and the global natural gas market are adapted to those of Canada. In addition, the North American concrete transport model [231] was used to model the proxy transport of crude steel and steel products in Canada. Therefore, the transportation distance for Canadian steel is approximately 72.9 km. Finally, since iron pellet is available in Quebec [232], it serves as a raw material for Canadian crude steel.

The following results (Table B. 11) present the difference between the modeling with made-in-Canada steel and a global one. According to the impact indicators, the impacts of a 1kg average Canadian steel are reduced from 2 to 7.5% compared to global steels.

Table B. 11 : Impacts of the supply 1 kg of steel product to the construction site from an average location in the world or Canada. Sensitivity from Global to Canada (%)

Structural Steel			Climate change		Human health		Ecosystem quality		Resources	
			kg CO ₂ eq.	%	DALY	%	PDF*m ² *year	%	MJ primary	%
min.	- Unalloyed steel, hot rolled - Reinforcing steel	World	3.62		4.3 E-6		1.27		36.46	
	- Unalloyed steel, sheet rolled	Canada	3.54	-2.3	3.9 E-6	-7.1	1.18	-7.3	34.81	-4.5
avg.	- Low-alloyed steel, hot rolled - Reinforcing steel	World	3.80		5.2 E-6		1.58		39.11	
	- Low-alloyed steel, sheet rolled	Canada	3.69	-2.9	4.9 E-6	-5.7	1.47	-7.5	37.17	-5.0
max.	- Chromium steel 18/8, hot rolled - Reinforcing steel	World	4.92		1.2 E-5		3.96		56.49	
	- Chromium steel 18/8, sheet rolled	Canada	4.82	-2.0	1.2 E-5	-2.7	3.88	-2.2	54.68	-3.2

Concrete dataset

In Table B. 12, we looked for a correspondence between the concrete designations of the case studies, the type of concrete used in the Quebec context, and the availability of data in the database to find the best match. The Concrete processes correspond to the Quebec region. They also include the transportation of raw materials.

Figure B. 8 presents the relative impacts of the concrete grade in the assessment. The minimum, medium, and maximum scenarios use concretes with 25, 35, and 30-32 MPa. Concretes with strength from 20 to 35 MPa, are the type of concrete for conventional projects, such as foundation, columns, beams, and slabs in a typical reinforced concrete building [233]. Concrete with strength from 40 to 50 MPa mainly suit for bridges constructions [233]. Concrete with a strength of 20 MPa suit for residential purposes without freeze-thaw conditions.

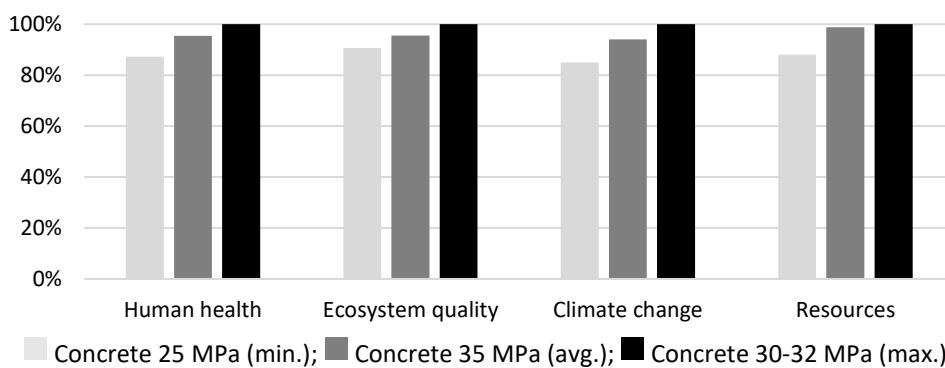


Figure B. 8 : Relative impacts of the supply of the concrete grades in Quebec

Table B. 12 : Concrete grade designations

Designation of case studies		Canadian Standards Association CSA (2020) [145]		Applications	
Concrete grade	note	Exposition class and building applications (minimal strength MPa)		Ecoinvent Martineau and Valsasina (2019) [142]–[144], [216], [217]	
Concrete	unspecified grade	//	//	//	//
Limestone, Clay and shale, Sand, ash, Semi-cementitious material, Coarse aggregate, Fine aggregate	Conventional structural materials				
Pre-cast concrete					
Concrete 17.5 MPa	NZ	//	//	//	//
Concrete 20 MPa	AUS	//		Intended for residential use (footings for walls, columns, fireplaces, chimneys, foundations, walls, grade beams, piers) not exposed to freeze-thaw according to Canadian CSA specs.	Concrete, 20 MPa {CA-QC}
Concrete C25/30 [25;30] N/mm ²	US, NO	F-2, R-1, R-2, R-3, N-CF. (25 MPa)	N for structural calculation purposes	Intended for residential, commercial, and industrial (interior slabs not exposed to freeze-thaw) according to the Canadian CSA specs.	Concrete, 25 MPa {CA-QC}
//		// F-1, S-3 (30 MPa)		Intended for non-structurally reinforced usage, exposed to chlorides and freezing and thawing (sidewalks, garage floors, porches, driveways, patio, curb and gutters) according to the Canadian CSA specs.	Concrete, 30-32 MPa {CA-QC}
Concrete 32 MPa	AUS	S-2 (32 MPa)			
Concrete C35/45 [35;45] N/mm ²	US, NO	S-1 (35 MPa)		Intended for commercial and industrial, structurally reinforced usage, exposed to chlorides and freezing and thawing conditions (bridge, decks, parking decks and ramps, etc.) according to the Canadian CSA specs.	Concrete, 35 MPa {CA-QC}
Concrete 40 MPa	NZ	//	C-XL	//	//
Concrete 65 MPa	AUS			Intended for structurally reinforced specialty usage, exposed to chlorides and other severe environments, with or without freezing and thawing conditions, and with high durability performances expectations (e.g., work of art etc.) according to the Canadian CSA specs.	Concrete, 50 MPa {CA-QC}
				//	//

Summary of transportation distances

Table B. 13 : Transportation distances in the wood supply chain

	Main scenario		Sensitivity Analysis		Other available data	
	Quebec - CA	Ontario - CA	Quebec and Ontario - CA		Quebec - CA	
Harvesting: Forest						
Dist. 1: Transport of wet sawlogs (km)	140.5 km	Same for Ontario due to lack of data	140.5 km +/- 100%	(85 tkm)	90 km (88.36 tkm)	
Source & assumption	[132]			[234]		[235]
1st transformation: Sawmill	Quebec - CA	Ontario - CA	Quebec and Ontario - CA		Quebec - CA	
Dist. 2: Transport of dry lumbers (km)	1118 km Max. between a sawmill and a mass timber factories (from Percé in Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine to Ripon in Outaouais)	Same for Ontario due to lack of data	1118 km +/- 100% 0 km can make sense because there is a sawmill close to mass timber factory (eg. at Chibougamau)		364 km	Estimation between sawmills closed to mass timber factory in Quebec eg. From Matagami to Chibougamau (Nord-du-Québec)
source/assumption						
2nd transformation: mass timber factories	Quebec - CA	Ontario - CA	Quebec and Ontario - CA			
Dist. 3: Transport of mass timber (km)	1107 km	Same for Ontario due to lack of data	1107 km +/- 100%			
source/assumption	[132]					
Construction Site	Quebec - CA					

Table B. 14 : Transportation distances in the steel supply chain

	Main scenario		Sensitivity Analysis
	Global	mix of Global, Canada, and Quebec	
Material Extraction: iron ore and coal mines			
Dist. 1: Transport of raw materials (km)	average of raw material markets	average of raw material markets	
source/assumption		[130]	
Steel ingot production (Basic Oxygen Furnace)	Global	Canada	
Dist. 2: Transport of steel ingot (km)	857.8 km	72.91 km	
source/assumption	[140]	Same as the concrete market in North of America	
Steel shaping	Global	Canada	
Dist. 3: Transport of steel product (km)	857.8 km	72.91 km	
source/assumption	Same as the steel ingot market.	Same as the concrete market in North of America	
Construction Site	Quebec - CA		

Table B. 15 : Transportation distances in the concrete supply chain

		Main scenario (no sensitivity analysis)
Material Extraction: Mines		mix of Global and Quebec
Dist. 1: Transport of raw materials (km) source/assumption		average of raw material markets [130]
Concrete factory		Quebec - CA
Dist. 2 (km) source/assumption		
No 2nd transformation		Quebec - CA
Dist. 3: Transport of concrete (km) source/assumption		72.91 km (168.35 tkm) [231]
Construction Site		Quebec - CA

B.2 Results and discussion

B.2.1 Impact displacement

The following table presents the environmental displacement ratio between a wood frame and a steel and concrete frame.

Table B. 16 : Environmental displacement ratio

Impact Ratio (Impact j_f / Impact w_f)	Climate change tonne CO₂ eq.	Human health DALY	Ecosystem quality PDF*m²*year	Resources MJ primary
min.	0.81	0.67	0.03	0.47
avg.	4.57	4.05	0.22	2.61
max.	13.53	20.40	1.16	8.43

For impact ratios less than 1, there is no avoided impact due to the use of wood instead of steel and concrete.

B.2.2 Targets of the emissions in Québec

Table B. 17 : Targets of the emissions in Québec in 2017, 2030, and 2050 [149]

years	1990	2012	2017*	2020	2030	2050
% reduction/1990	//	-6.0%	-14.8%	-20.0%	-37.5%	-87.5%
net target emission (Mt CO ₂ eq.)	84.70	79.62	72.21	67.76	52.94	10.59
reduction (Mt CO ₂ eq.)/1990	//	-5.08	-12.49	-16.94	-31.76	-74.11

* The target emission in 2017 compared to 1990, is the result of a linear regression between the targets of 2012 and 2020

Table B. 18 : Proportion of the avoidances regarding the reduction targets

years		2017	2030	2050
avg. climate change displacement (Mt CO ₂ eq.) (Figure 4. 3)		-0.50	-1.16	-2.62
% (avoidance/reduction)		4.0%	3.7%	3.5%

B.2.3 Larger contributors to wood product manufacturing

Table B. 19 presents the larger contributors to the wood product impacts that may imply final results against the wood. It shows that except for the land occupation and the emission of wood ash mixture, the contributors are the same, whatever is the impact category.

Table B. 19 : The largest contributors to the 3 manufacturing stages of wood products according to the four impacts

Human health					
CLT, manufacturing (Qc)	Sawnwood, sawing-drying-planing (Qc)	Sawlog, logging (Qc)			
Transport (Dist3)	30.3%	Transport (Dist2)	28.3%	Transport (Dist1)	25.6%
Adhesive	43.4%	Sawing	31.4%	Diesel burnt in building and forestry machinery	71.2%
Electricity	8.5%	Drying	37.1%		
Others	17.9%	Others	3.2%	Others	3.2%
Ecosystem quality					
CLT, manufacturing (Qc)	Sawnwood, sawing-drying-planing (Qc)	Sawlog, logging (Qc)			
Transport (Dist3)	38.2%	Transport (Dist2)	18.5%	Land occupations	99.6%
Adhesive	19.6%	Sawing	-65.0%		
Wood ash mixture emission (from combustion from heat production)	27.6%	Drying	15.8%		
Electricity	6.1%				
Others	8.5%	Others	149.2%	Others	0.4%
Climate change					
CLT, manufacturing (Qc)	Sawnwood, sawing-drying-planing (Qc)	Sawlog, logging (Qc)			
Transport (Dist3)	34.5%	Transport (Dist2)	70.8%	Transport (Dist1)	42.3%
Adhesive	38.1%	Sawing	14.2%	Diesel burnt in building and forestry machinery	50.0%
Electricity	20.1%	Drying	7.5%		
Others	7.3%	Others	7.5%	Others	7.7%
Resources					
CLT, manufacturing (Qc)	Sawnwood, sawing-drying-planing (Qc)	Sawlog, logging (Qc)			
Transport (Dist3)	30.6%	Transport (Dist2)	73.6%	Transport (Dist1)	44.5%
Adhesive	44.6%	Sawing	12.4%	Diesel burnt in building and forestry machinery	47.7%
Electricity	18.9%	Drying	7.4%		
Others	5.9%	Others	6.6%	Others	7.8%

B.2.4 Sensitivity analysis

In this section, the sensitivity analysis presents the effects of the sf_i variability, and the choice of the material impacts data sets. Then, it presents the changes at the overall scale of the Quebec NR building stock for the three years (2017, 2030, and 2050) of the average scenario.

Material substitution factors and material impacts data sets

The variability of the substitution factors implies a variability on the result that is greater than 100% for the indicators of climate change, human health, and resources. Indeed, the lowest substitution factors change the sign of the impact displacement (Table B. 20). For the ecosystem quality indicator, the impact displacement remains positive for the minimum and the maximum scenario. D'Amico *et al.* (2020) assessed the variability of the materials substitution in one archetype for a large-scale. It caused a variability on the avoided CO₂ eq. emissions of +/- 27% for the all life cycle [29]. Considering several types of buildings, in this paper, it caused a variability of avoided CO₂ eq. emissions between - 104% and + 178%.

Table B. 20 : Sensitivity analysis on sf_i and material impacts datasets

Impact Category	sf_i	Steel & Concrete dataset	2017	2030	2050	Changes related to the avg. scenario
Climate change (t CO₂ eq.)	min.	min.	27050	62745	141727	105%
	min.	avg.	21145	49049	110791	104%
	avg.	min.	-463517	-1075176	-2428595	7%
	avg.	avg.	-500701	-1161427	-2623416	
	avg.	max.	-655595	-1520720	-3434984	-31%
	max.	avg.	-1392638	-3230367	-7296714	-178%
Human health (DALY)	max.	max.	-1757835	-4077479	-9210161	-251%
	min.	min.	64	147	333	111%
	min.	avg.	36	83	187	106%
	avg.	min.	-462	-1071	-2419	22%
	avg.	avg.	-592	-1373	-3101	
	avg.	max.	-1483	-3439	-7768	-151%
Ecosystem quality (PDF*m²*yr)	max.	avg.	-1672	-3877	-8758	-182%
	max.	max.	-3762	-8727	-19712	-536%
	min.	min.	1.08 E+09	2.50 E+09	5.65 E+09	23%
	min.	avg.	1.07 E+09	2.48 E+09	5.60 E+09	22%
	avg.	min.	9.19 E+08	2.13 E+09	4.81 E+09	5%
	avg.	avg.	8.76 E+08	2.03 E+09	4.59 E+09	
Resources (MJ primary)	avg.	max.	5.65 E+08	1.31 E+09	2.96 E+09	-35%
	max.	avg.	5.45 E+08	1.27 E+09	2.86 E+09	-38%
	max.	max.	-1.84 E+08	-4.26 E+08	-9.63 E+08	-121%
	min.	min.	1.27 E+09	2.95 E+09	6.67 E+09	133%
	min.	avg.	1.19 E+09	2.76 E+09	6.23 E+09	131%
	avg.	min.	-3.38 E+09	-7.84 E+09	-1.77 E+10	12%
	avg.	avg.	-3.85 E+09	-8.93 E+09	-2.02 E+10	
	avg.	max.	-6.12 E+09	-1.42 E+10	-3.21 E+10	-59%
	max.	avg.	-1.25 E+10	-2.90 E+10	-6.55 E+10	-224%
	max.	max.	-1.78 E+10	-4.13 E+10	-9.34 E+10	-363%

One alternative material substitution

There may be architectures where the wood structure replaces only steel or concrete (Table B. 3 and Figure B. 9).

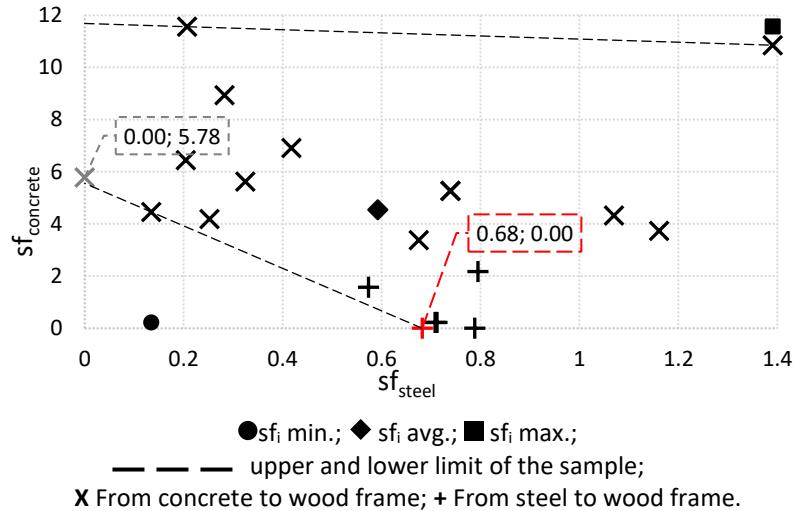


Figure B. 9 : Range of substitution factors of the sample

For both cases, Figure B. 10 shows the impact displacements. The "concrete only" scenario considers that 1 tonne of wood structure replaces only 5.78 tonnes of concrete. The concrete grade is the one with the least environmental impact (25 MPa). The "steel only" scenario considers that 1 tonne of wood structure replaces only 0.68 tonnes of steel. The steel grade is the one with the least environmental impact (unalloyed hot rolled steel, unalloyed and low-alloyed reinforcing steel, and unalloyed sheet steel). Both scenarios are between the minimum and the average. This does not change the conclusions.

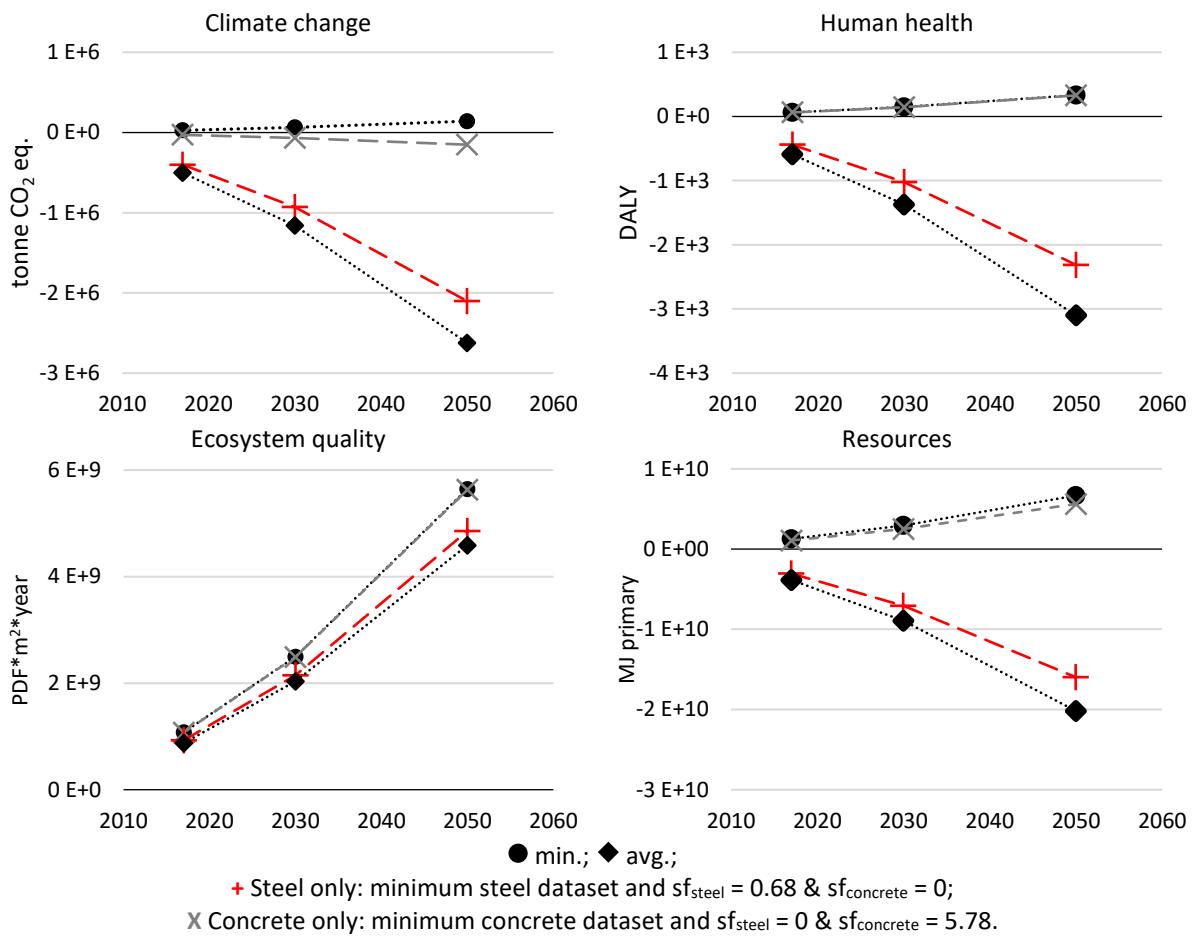


Figure B. 10 : Sensitivity for only one material substitution with its minimum dataset

Wood

Stake of wood supply

Since there is no change at the product level (Figure B. 6), there is even less visible change at the total building stock level. It does not change the conclusion of the three scenarios (Table B. 21).

Table B. 21 : Impact displacements in the construction supply chain by substituting steel and concrete with the wood coming from Quebec only or Quebec and Ontario

Climate change (tonne CO ₂ eq.)			Human health (DALY)		
Total with wood products from Quebec and Ontario	Total with wood products from Quebec only (ref.)	Sensitivity from Quebec to Quebec and Ontario (%)	Total with wood products from Quebec and Ontario	Total with wood products from Quebec only (ref.)	Sensitivity from Quebec to Quebec and Ontario (%)
2017 -5.01 E+5	-5.01 E+5		-592	-592	
2030 -1.16 E+6	-1.16 E+6	< 0.2%	-1,373	-1,373	< 0.2%
2050 -2.62 E+6	-2.62 E+6		-3,101	-3,101	
Ecosystem quality (PDF*m ² *year)			Resources (MJ primary)		
Total with wood products from Quebec and Ontario	Total with wood products from Quebec only (ref.)	Sensitivity from Quebec to Quebec and Ontario (%)	Total with wood products from Quebec and Ontario	Total with wood products from Quebec only (ref.)	Sensitivity from Quebec to Quebec and Ontario (%)
2017 8.76 E+8	8.76 E+8		-3.85 E+09	-3.85 E+09	
2030 2.03 E+9	2.03 E+9	< 0.2%	-8.94 E+09	-8.94 E+09	< 0.2%
2050 4.59 E+9	4.59 E+9		-2.02 E+10	-2.02 E+10	

Sensitivity on transportation distances of wood products

Reducing a single transport distance (be it the transportation of the roundwood, the lumbars, or the structural wood products in Quebec or Ontario) is not enough to make the avoided impacts negative. Even without distances, the minimum scenarios still have positive impacts on the indicators of human health and resources. For the climate change indicator, the minimum scenario is negative but represents, in absolute value, 6 % of the average scenario. To be positive, the maximum scenario of the ecosystem quality indicator, the log transport distance would have to exceed 1915 km (or 10425 km for the sawnwood transportation or 10790 km for the engineering wood product). It is seven times the upper average of log transport distance (or, either more ten times for the sawnwood, or nine times for the engineering wood products). The sensitivity analyses show how much each scenario is sensitive to a change in all distances of +/- 100% (i.e. from 0 km to 281 km for the logs, to 2236 km for the lumbars, and to 2214 km for the structural products - Table B. 22).

Table B. 22 : Sensitivity analyses on transport distances (+/-100%) in the wood supply chain

Transportation distances +/-100%					
scenario	Climate change	Human health	Ecosystem quality	Resources	
min.	+/- 236%*	+/- 86%	+/- 5%	+/- 83%	
avg.	-/+ 13%	-/+ 9%	-/+ 7%	-/+ 27%	
max.	-/+ 4%	-/+ 1%	-/+ 31%	-/+ 6%	

*: For a transportation distance of 0 km (-100%), the avoided impact in the scenario is changed by - 236% (< -100%) => the scenario becomes negative.

A change in all distances of +/-100% does not change the trends and the conclusions of Figure 4. 5 in the manuscript, except for one scenario in the climate change indicator. It is the minimum

scenario that becomes negative (there is avoided impacts with wood). Table B. 22 also shows that the more the impact is close to the x-axis, the more the transportation distances can influence it. Indeed, the minimum scenarios of Climate change, human health, and resources, and the maximum scenario of ecosystem quality have a greater sensitivity to transportation.

Steel (Canada vs Global)

The modeling of Canadian steel implies that the total impact displacement is reduced by 3% for the climate change indicator, by 6% for human health and 7% for resources. For the ecosystem quality indicator, the total impact displacement increases by 2% (Table B. 23).

Table B. 23 : Total impact displacements in the construction supply chain by substituting steel (global to Canadian average) and concrete with wood. Sensitivity from Global to Canada (average scenario)

Climate change (tonne CO ₂ eq.)			Human health (DALY)		
Total with Canadian steel	Total with global steel (ref.)	Sensitivity from global to Canada (%)	Total with Canadian steel	Total with global steel (ref.)	Sensitivity from global to Canada (%)
2017 -4.86 E+05	-5.01 E+05		-554	-592	
2030 -1.13 E+06	-1.16 E+06	+ 3%	-1,285	-1,373	+ 6%
2050 -2.55 E+06	-2.62 E+06		-2,901	-3,101	
Ecosystem quality (PDF*m ² *year)			Resources (MJ primary)		
Total with Canadian steel	Total with global steel (ref.)	Sensitivity from global to Canada (%)	Total with Canadian steel	Total with global steel (ref.)	Sensitivity from global to Canada (%)
2017 8.91 E+08	8.76 E+08		-3.60 E+09	-3.85 E+09	
2030 2.07 E+09	2.03 E+09	- 2%	-8.35 E+09	-8.93 E+09	+ 7%
2050 4.67 E+09	4.59 E+09		-1.89 E+10	-2.02 E+10	

Despite the changes (avoided impacts of steel Canada lower the avoided impacts of steel from the rest of the world), the conclusions do not change. The averages scenarios keep the same trend of steel from the rest of the world. It does not change the conclusion of the three scenarios.

ANNEXE C : Documents supplémentaires – chapitre 5

C.1 Methodology

C.1.1 Reference flows

End-of-life

Currently, particleboard (PB) production uses end-of-life wood as raw material. Cogeneration uses it as an energy source in biomass boilers at paper mills and as an alternative fuel in cement plants. In 2018, sorting centers sent 28% of shredded wood to recycling plants for panel manufacturing and 72% to energy recovery [164].

First scenario – cogeneration 1

Cogeneration systems produce electricity and heat simultaneously from a single primary source (combined heat and power - CHP). Then, wood-fired CHP can replace another source of electricity and, or another source of heat and, or, another source of CHP.

Regarding the inputs of the wood-based cogeneration and energy industries, CRD wood wastes compete with virgin fiber, mainly when there is a surplus in the wood fiber market [236], even if the virgin wood can be more expensive [237]. The share of virgin wood is low compared to other types of wood. Indeed, the inputs are 4% virgin roundwood and 6% biomass, the rest being sawmill co-products and CRD wood [167] (Table C. 1). The authors assume that virgin roundwood that feeds the energy industries is constrained due to its non-conformity for sawmills [171]. Also, sawmill co-products (a constrained resource) compete with post-consumer wood products. Indeed, the government requires that surplus wood residues from sawmills be recovered (or disposed of) at least once a year [238]. Moreover, the virgin roundwoods and the sawmill co-products can be of better quality because they are easier to sort according to species with fewer impurities than post-consumer wood. The combustion of contaminants in CRD wood (plastics, flammable materials) can prevent compliance with air emission standards. With the implementation of the Clean Air Regulation [239], the industry has seen a demand for wood of similar quality for recycling and energy recovery. Paper mills, for example, require a quality that is increasingly difficult for sorting plants to achieve [240]. The lack of markets can also confront recyclers with a surplus. This excess inventory leads to increased costs, which affects the profitability and competitiveness of recycled wood [237]. Considering that buildings are gradually reaching the end of their life, they will add to the supply of wood products for recycling. So, the full utilization of wood from CRD is uncertain in 70 years. If not fully utilized, it should avoid landfilling but it is about to be forbidden [173]. The authors also assume it does not avoid infinite storage. Therefore, the authors assume that wood recycling, in the long term, will neither avoid landfills, nor virgin wood. In this case, it is recycled to full fill an additional demand for recycled wood.

Table C. 1 : Evolution of wood consumption ('000 m³) in the cogeneration and energy products industries (Quebec) - From private and public forests, from outside Quebec and from sales (or exchanges) between plants [165]–[167]

Years	Tree species	Roundwood	Barks	Sawdust & shavings	Wood residues + biomass + chips	Wood residues	Biomass	Chips	Wood deconstruction	Total
2013	Softwoods	138	2050	474	431	n.a.	n.a.	n.a.	242	4042
	Hardwoods		386	240	81					
2014	Soft.	177	2218	571	143	137	120	61	756	4762
	Hard.		421	301	175					
2015	Soft.	162	1944	470	180	233	143	116	803	4420
	Hard.		362	187	311					
2016	Soft.	128	2048	515	179	186	168	94	732	4537
	Hard.		382	284	269					
2017	Soft.	163	1853	538	157	106	133	115	612	4225
	Hard.		434	271	198					
2018	Soft.	176	1950	539	114	103	123	109	627	4375
	Hard.		420	328	222					
2019	Soft.	198	1883	654	n.a.	118	268	138	644	4854
	Hard.		580	371	n.a.					
2020	Soft.	213	2180	651	n.a.	178	238	323	448	5067
	Hard.		470	366	n.a.					
Average % in last years		3.7%	54.1%	18.6%	9.4%	3.3%	3.7%	2.9%	13.4%	

Wood-based cogeneration can substitute a heat and electricity source. Regarding electricity, ecoinvent v.3.6 affects a mix of natural gas (from Ontario), wind, wood, and hydropower as the affected long-term sources [241]. Among the main sources, hydroelectricity could dominate primary energy demand in Quebec but would be constant or slightly increased from 2030 to 2050. Then, refined petroleum products are decreasing. In third and fourth place, natural gas and other renewables resources are increasing slightly (Figure C. 1). Among renewable resources, wind power shows the best potential to increase its capacity (Figure C. 3). In Ontario, natural gas generation is also about to increase (Figure C. 2). In the first cogeneration scenario, the authors assume that cogenerated electricity replaces wind power. The heat from the cogeneration does not replace any other heat source.

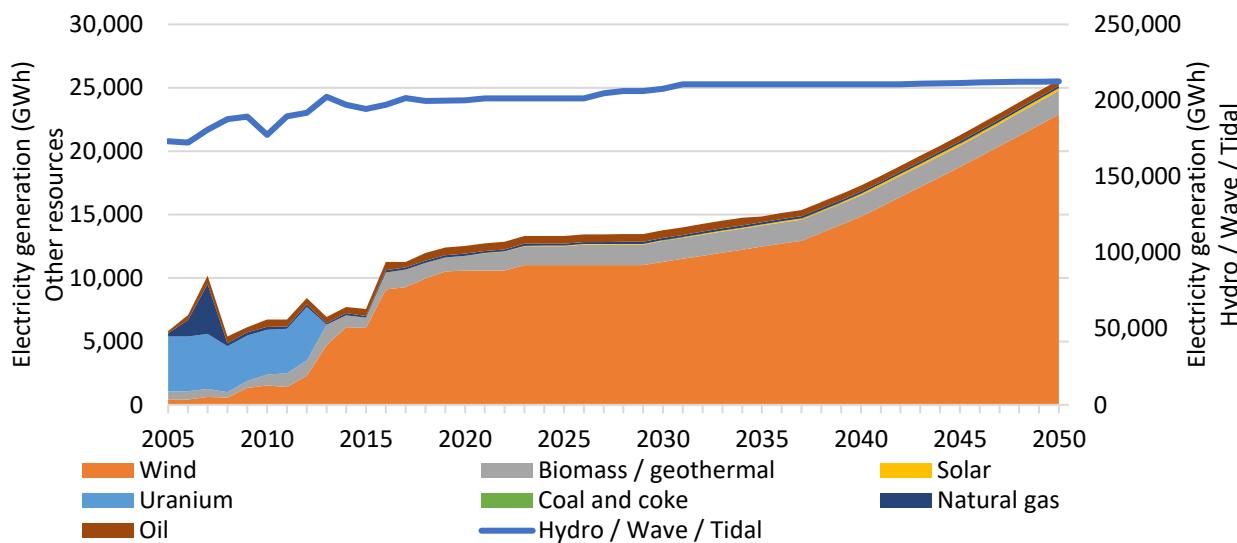


Figure C. 1 : Electricity generation (GWh) in Quebec (CA) [242]

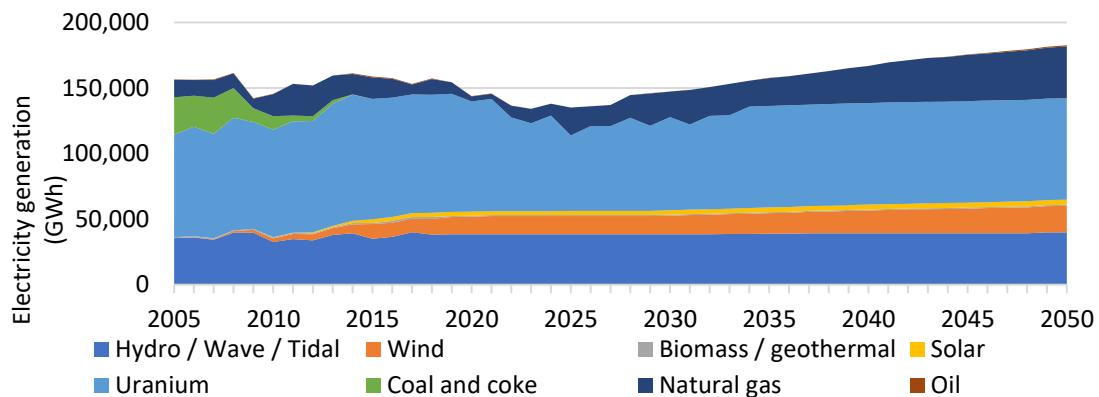


Figure C. 2 : Electricity generation (GWh) in Ontario (CA) [242]

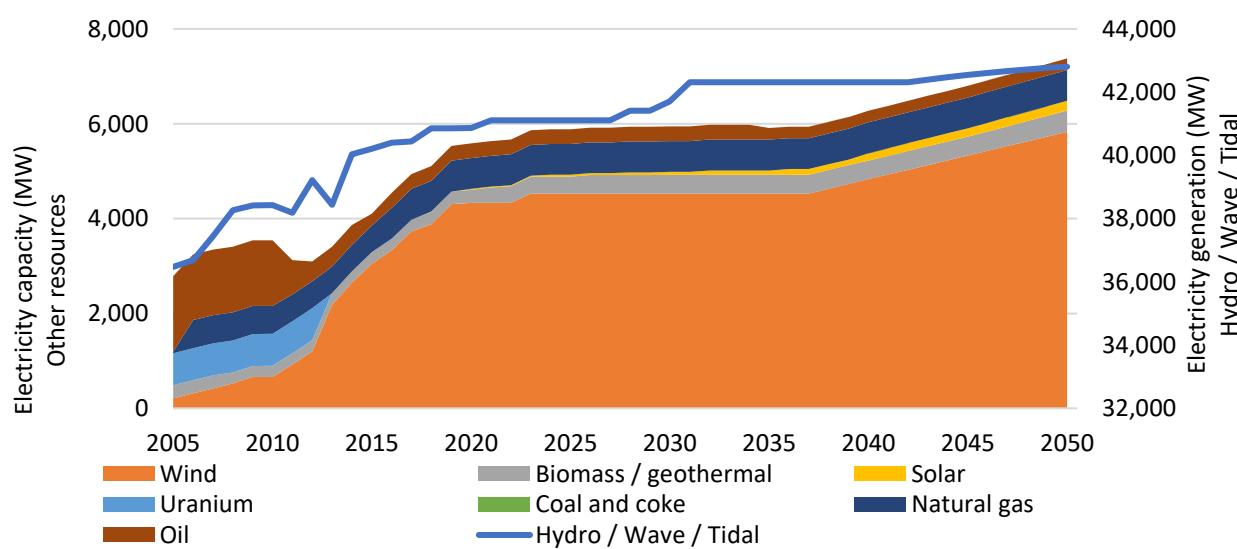


Figure C. 3 : Electricity capacity (MW) in Quebec (CA) [242]

Second scenario – cogeneration 2

Cogeneration technologies can use other inputs. To guarantee the electrical supply, biomass cogeneration plants also incorporate backup boilers of equivalent capacity running on heavy fuel oil or natural gas [164], [174]. Natural gas is assumed to be an unconstrained resource. Also, the trend of natural gas demand is slightly increasing (Figure C. 4). Heavy fuel oil is a remnant from the distillation and cracking process of petroleum (i.e., a by-product of the crude oil refining process). So, the heavy fuel oil is a constrained product. In the second cogeneration scenario, wood replaces natural gas.

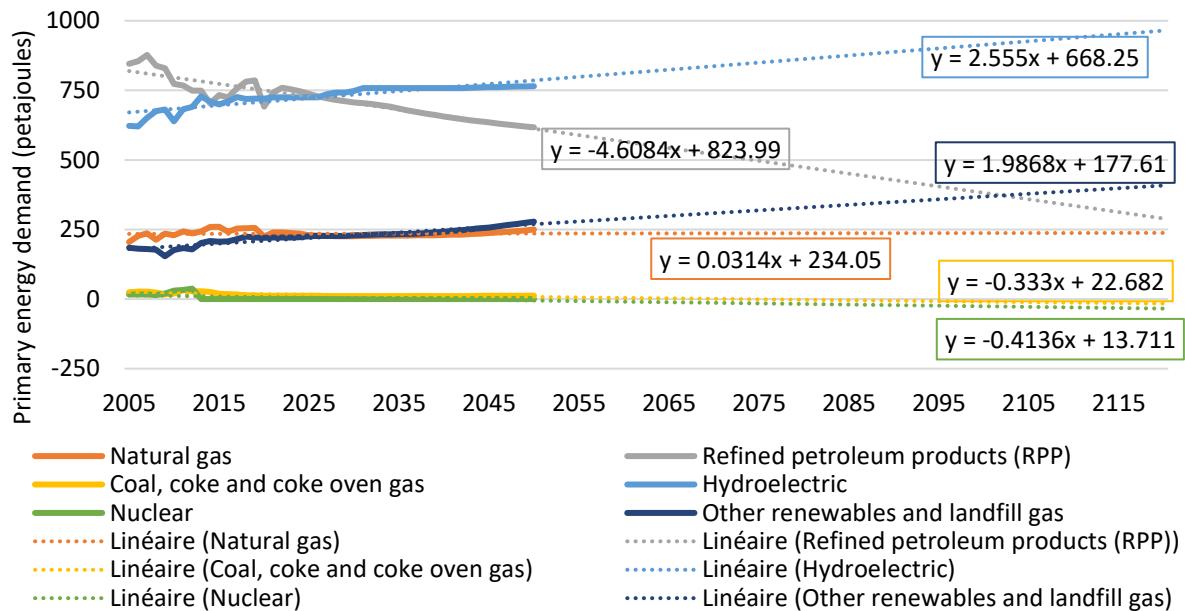


Figure C. 4 : Primary energy demand (petajoules) in Quebec (CA) [242]

Third scenario - panel industries

Particleboard is mainly manufactured from sawmill co-products (sawdust, shavings, and chips) and recycled wood from dismantling [169]. They can also consume roundwood [167]. For some factories, roundwood represents 9% of the particleboard [170]. However, for the same reasons as cogeneration, wood from end-of-life structures does not replace the virgin round wood that feeds the panel industry. Of course, roundwood accounts for 47.5% of the panel industry's input (Table C. 2), but the majority of this virgin roundwood is hardwood and poplar, not softwood [167]. These hardwood species are under-utilized regarding the forestry potential [243]. Also, OSB mills in Quebec use virgin hardwood [205]. Indeed, the technology requires virgin wood with high moisture content. It allows for better control of chip size and OSB production.

Table C. 2 : Evolution of wood consumption ('000 m³) in the veneer, plywood and panel industries (Quebec) - From private and public forests, from outside Quebec and from sales (or exchanges) between plants [165]–[167]

Years	Roundwood	Chips	Wood residues + deconstruction wood + sawdust & shavings	Total
2013	1806	598	1861	4265
2014	1930	646	1903	4479
2015	1791	700	1899	4390
2016	2115	718	1723	4556
2017	2167	655	1886	4708
2018	2242	666	1790	4698
2019	2071	733	1743	4547
2020	2488	678	1488	4654
Average % in last years	45.7%	14.9%	39.5%	

Table C. 3 : Roundwood consumption ('000 m³) in the veneer, plywood and panel industries (Quebec) - From private and public forests, from outside Quebec and from sales (or exchanges) between plants [207], [243], [244]

Years	Veneer and plywood	OSB	Fibreboard or particleboard
2011	173	1468	169
2012	167	1604	180
2013	200	1435	171
2014	191	1557	182
2015	201	1405	185
2016	235	1677	204
2017	289	1647	230
2018	300	1703	239
2019	202	*1640	*230
Average % in last years	10.7%	79.6%	9.7%

*Estimation from the total of OSB and board in 2019, and their share in 2018

The consumption of roundwood represents 4.4% (=9.7% - Table C. 3 - of 45.7%) of the total wood consumption of particleboards.

C.2 Results and discussion

C.1.2 Reference substitution scenario

Figure C. 6 presents the second end-of-life scenario. The avoidance of natural gas for CHP is more advantageous than heat production and avoidance of electricity production of ref-1 (Figure C. 5). And Figure C. 7 presents the last end-of-life scenario with the reference substitution.

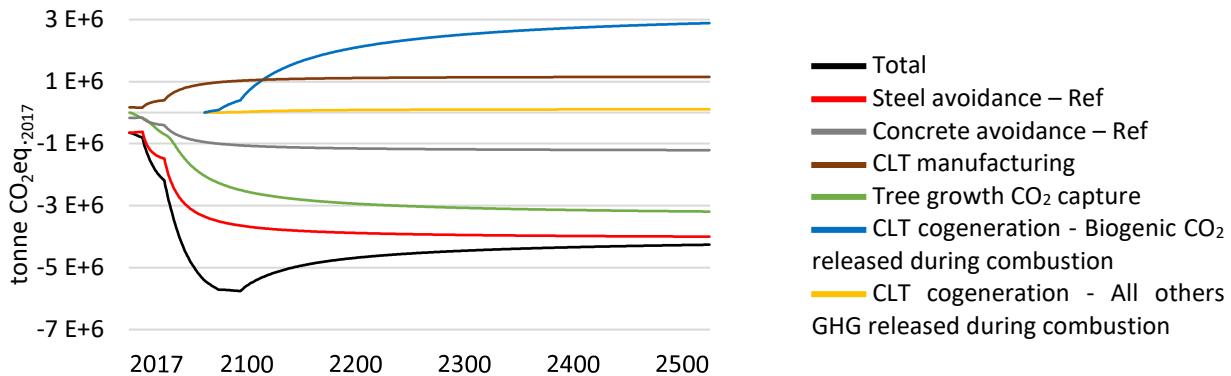


Figure C. 5 : Cogeneration with EOL structures - Scenario ref-1

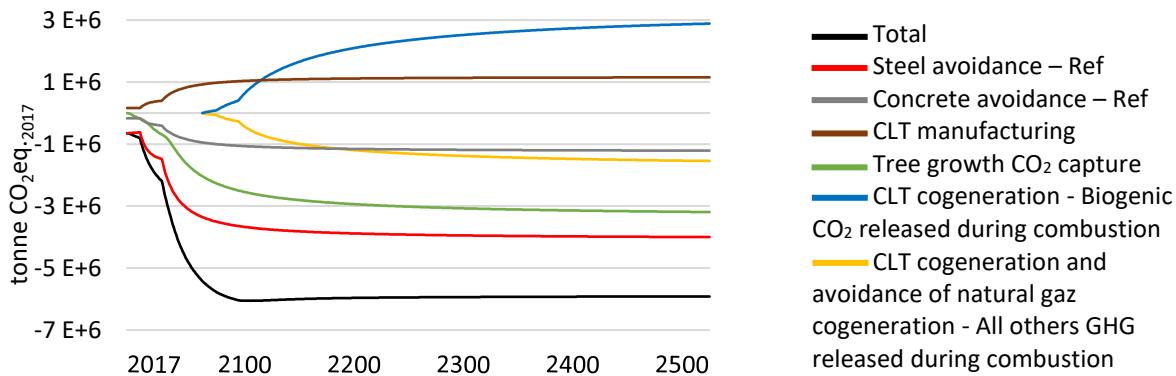


Figure C. 6 : Cogeneration with EOL structures instead of Cogeneration with natural gaz - Scenario ref-2

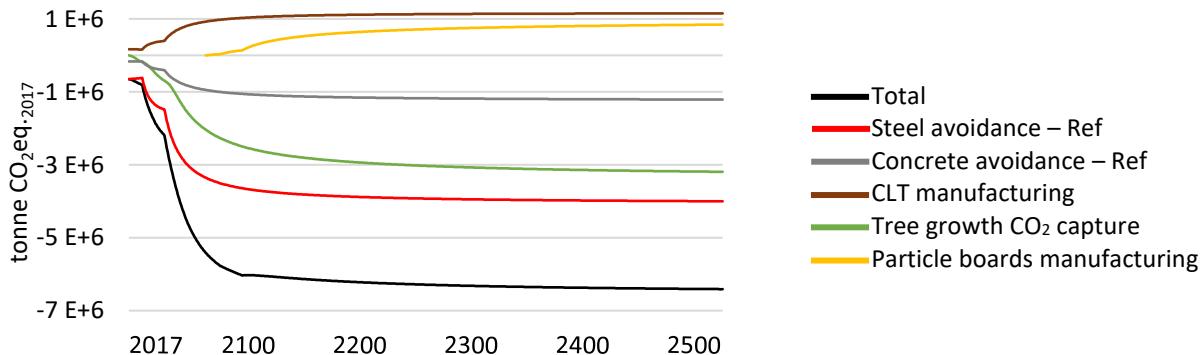


Figure C. 7 : Particle boards made from EOL structures - Scenario ref-3

C.1.3 Conservative substitution scenario

Compared to the previous figures (Figure C. 5, Figure C. 6, and Figure C. 7), only the material substitution is different. 1 kg of structural wood product displaces less steel and concrete. And the climate change impacts of steel and concrete supply are also lower (climate change impacts of conservative steel = 22% climate change impacts of reference steel, and climate change impacts of conservative concrete = 4% climate change impacts of reference concrete). This conservative material substitution can have an impact on climate change [163].

In Figure C. 8, the total result becomes positive in the very long term. There are two reasons for this. Substitution is not sufficient, and biogenic CO₂ emissions will offset the effect of the sequestration.

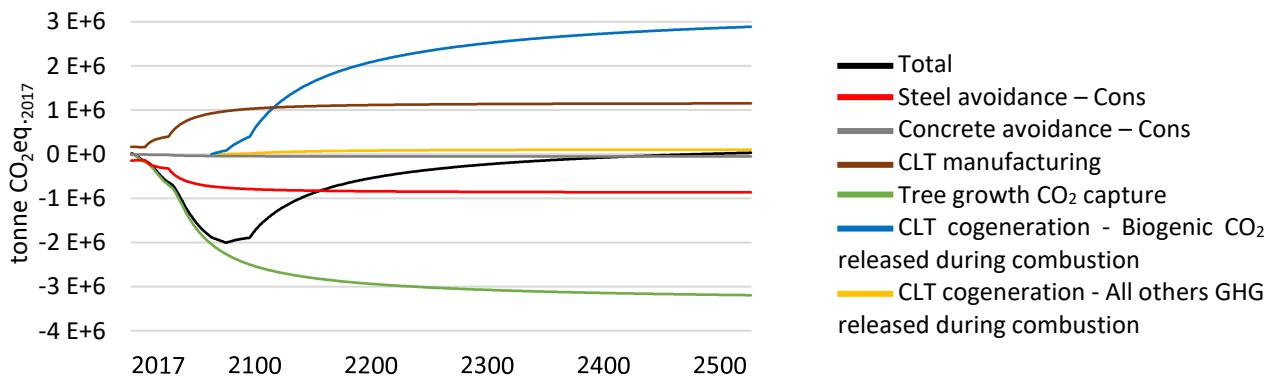


Figure C. 8 : Cogeneration with EOL structures - Scenario cons-1

Regarding cons-2 (Figure C. 9), despite the conservative substitution and the compensation of sequestration by long-term biogenic CO₂ emissions, the total impact remains negative. The avoidance of natural gas for CHP contributes to the total result in the very long term.

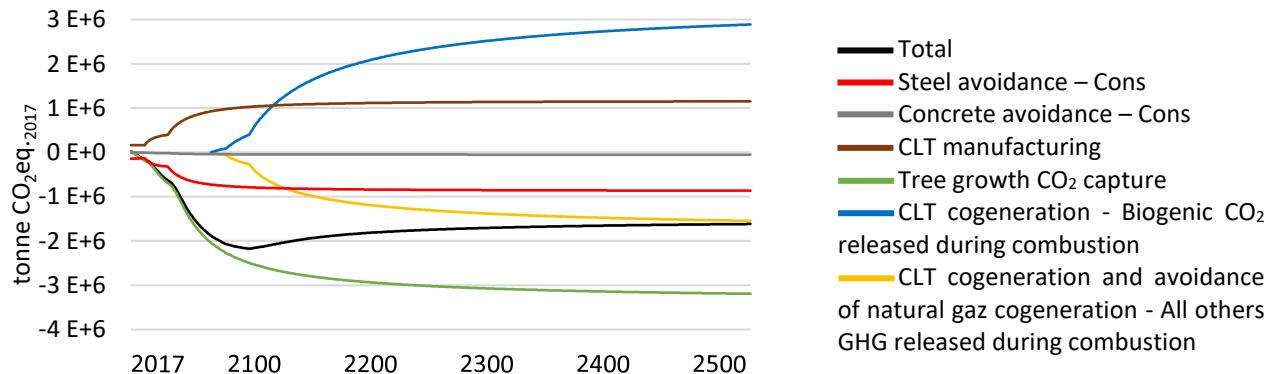


Figure C. 9 : Cogeneration with EOL structures instead of cogeneration with natural gaz - Scenario cons-2

Finally, Figure C. 10 shows the same as Figure C. 7. The non-emission of biogenic CO₂ keeps the total impact negative.

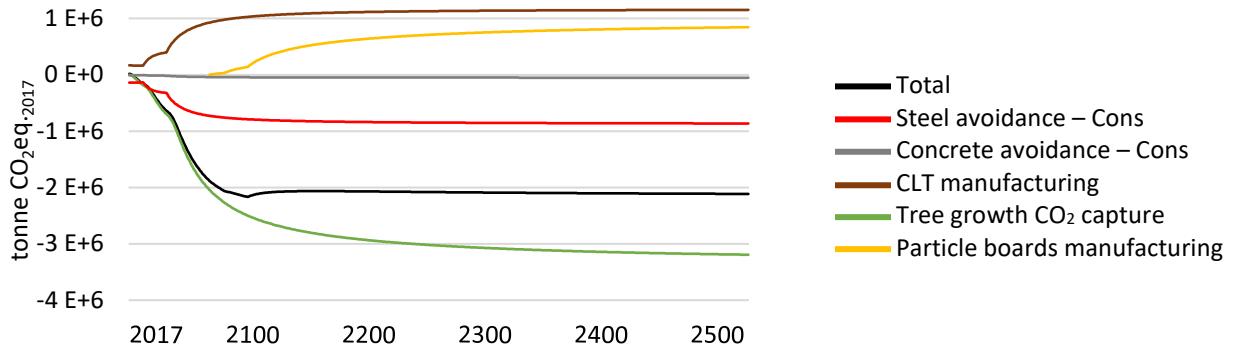


Figure C. 10 : Particle boards made from EOL structures - Scenario cons-3

C.1.4 Comparison of the scenarios

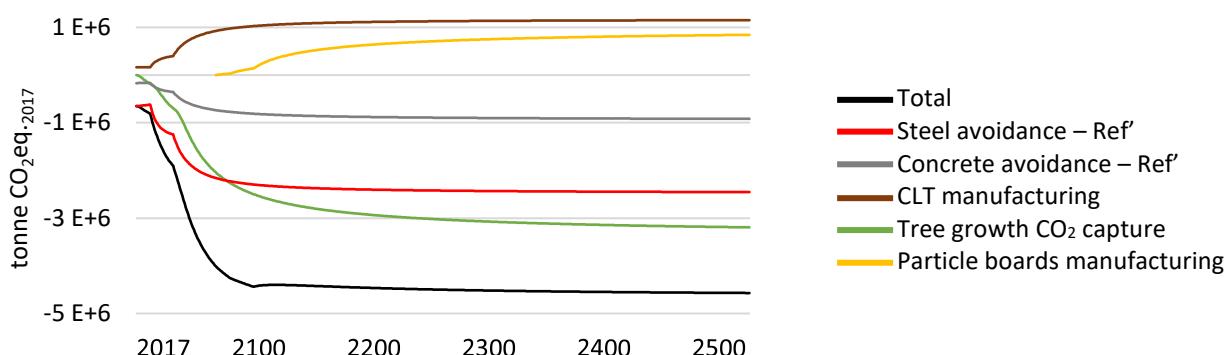
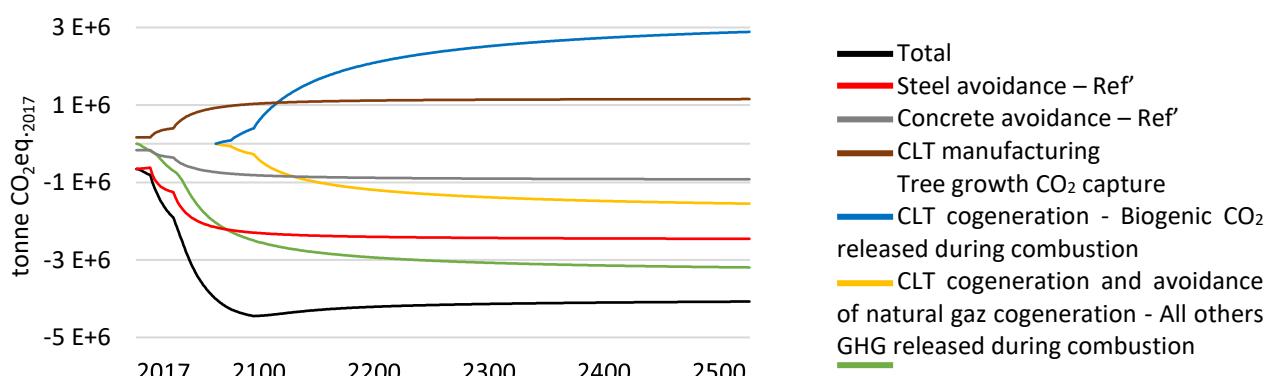
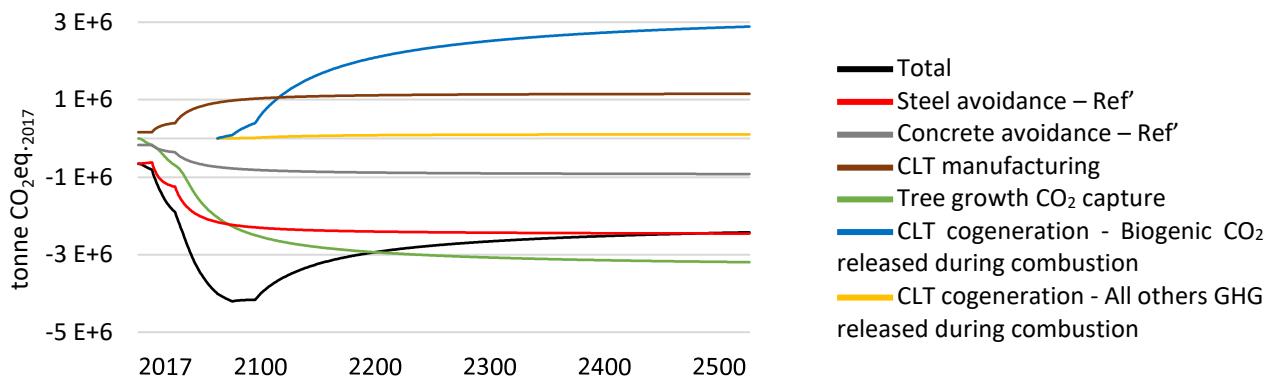
Since technologies are likely to improve in the future, the following sections present the sensitivity analysis on the GHG intensities of steel ingot and cement production in 2030 and 2050.

Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities

Sensitivity - Reference substitution scenario

The roadmaps and other references do not systematically specify the boundaries of the reduction or whether it is a reduction in CO₂ or CO₂eq. So, the reduction concerns the GHGs of cement and steel ingot production. It allows for a conservative assessment. Roadmaps target reductions between 25% in 2030 and 38% in 2050 [176]. Others target a 20% reduction by 2030 for the cement industry and 100% by 2050 for the concrete industry with carbon capture and storage (CCS) technologies [178], or less optimistic with a 24% reduction in direct emissions by 2050 [176]. Regarding steel, Direct Reduced Iron (DRI) production with straw, bamboo, charcoal, or wood charcoal fuel can reduce steel manufacturing emissions by around 60% [179]. On a European scale, a company has set itself the goal of reducing its CO₂ emissions by 30% by 2030, with the ambition of becoming carbon neutral by 2050 [245]. A roadmap targets a 60% reduction in the direct CO₂ emissions intensity of steel production by 2050 [177]. The modeling considers a GHGs reduction of 25% in 2030 and 38% in 2050 for cement production. For Steel ingot production, the modeling considers a GHGs reduction of 30% in 2030 and 60% 2050.

The figures (Figure C. 11, Figure C. 12, and Figure C. 13) show the effect of GHG emissions normalized to 1 kg of CO₂ emitted in 2017.



Sensitivity - Conservative substitution scenario

Compared to the previous figures (Figure C. 11, Figure C. 12, and Figure C. 13), only the material substitution is different. 1 kg of structural wood product displaces less steel and

concrete. And the climate change impacts of steel and concrete supply are also lower (climate change impacts of conservative steel = 22% climate change impacts of reference steel, and climate change impacts of conservative concrete = 4% climate change impacts of reference concrete). This conservative substitution scenario may have an impact on climate change. [163]. In Figure C. 14, the total result becomes positive sooner than in Figure C. 8.

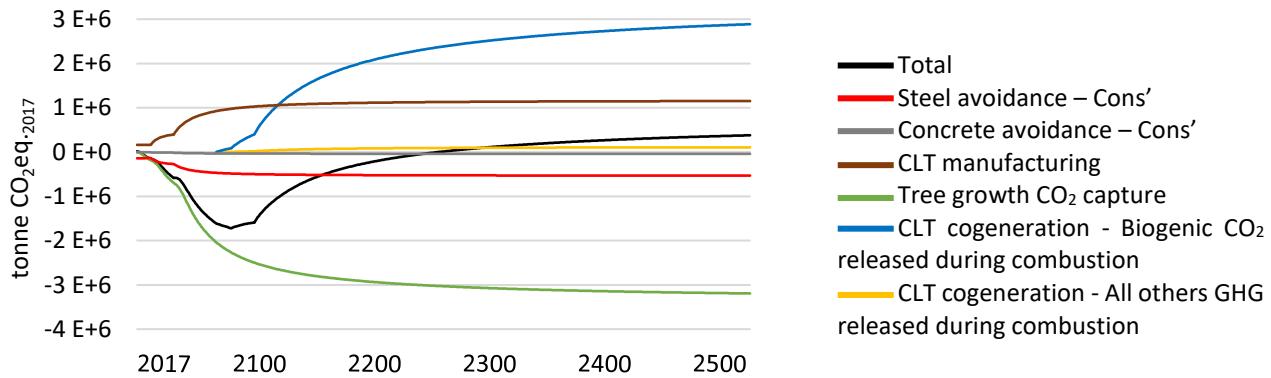


Figure C. 14 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures - Scenario cons'-1

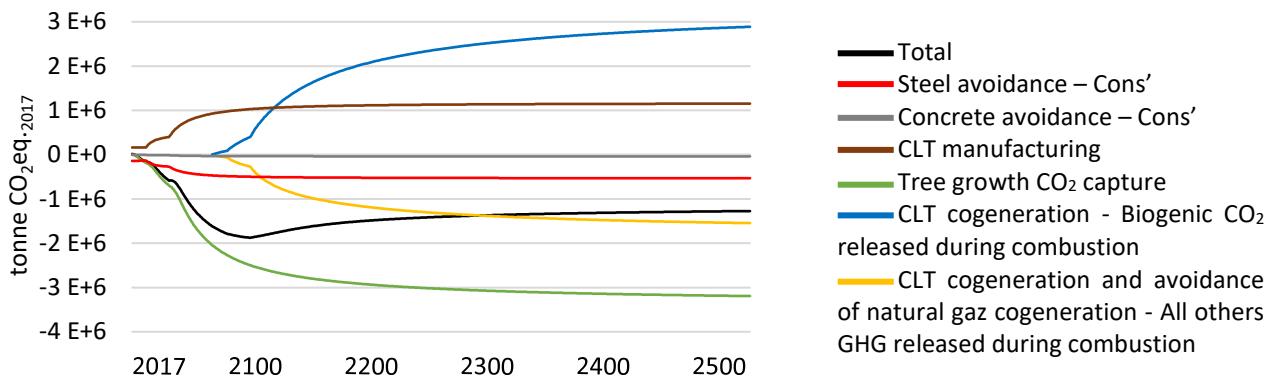


Figure C. 15 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of cogeneration with end-of-life structures instead of cogeneration with natural gaz - Scenario cons'-2

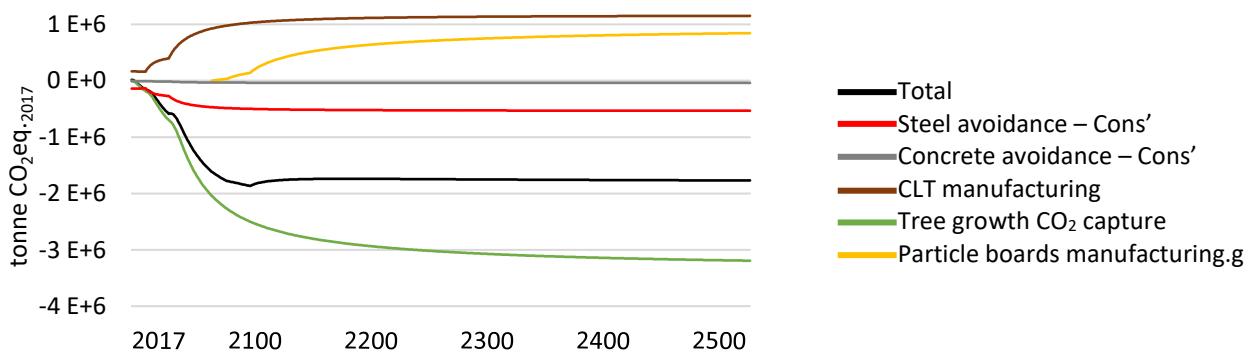


Figure C. 16 : Sensitivity analysis on the steel ingot and cement GHG intensities for the scenario of particle boards made from end-of-life structures - Scenario cons'-3

The total of cons'-1 (Figure C. 14) changes sign earlier than that of cons-1 (Figure C. 8). The total of Figure C. 11 (respectively Figure C. 12, Figure C. 13, Figure C. 15, and Figure C. 16) shows a lower impact avoidance than that of Figure C. 5 (respectively Figure C. 6, Figure C. 7, Figure C. 9, and Figure C. 10).

Sensitivity - Comparison of the scenarios

The following figure (Figure C. 17) summarizes the two substitution scenarios with the three end-of-life scenarios for a decreasing and a constant GHG intensity of steel ingot and cement production.

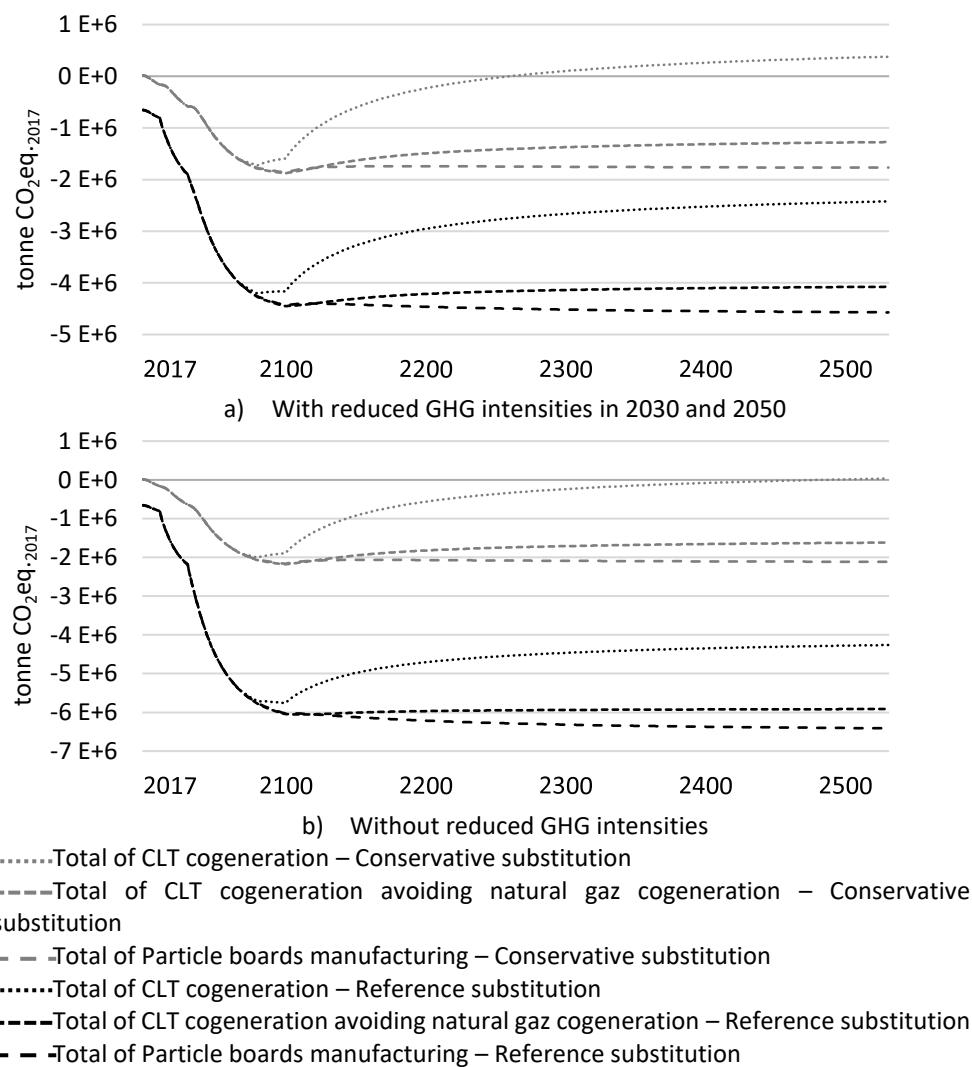


Figure C. 17 : Comparison of the conservative and reference substitution scenarios with (a) decreasing and (b) constant GHG intensity of steel ingot and cement production

C.3 Static and dynamic characterization

As equation 5. 13 shows in the manuscript, the later an emission appears in the inventory, the lower its CO₂ equivalent (emitted in 2017 i.e., CO_{2eq.2017}) will be in short term. Indeed, 1kg of CO₂ released in 2017 will have a higher cumulative effect until 2117 than 1kg of CO₂ released in 2087 or 2100. It is due to the time lag between the reference (denominator of equation 5. 13) and an emission from the inventory (numerator). Also, in the inventory, the quantity of CO₂ sequestered is equal to the one re-emitted instantaneously at the end of life but more spread out over time (depending on the growth rate of the trees). In Figure C. 5, Figure C. 6, Figure C. 8, and Figure C. 9, the impacts of the sequestration and the re-emission show the opposite. The decrease in the relative metric (tonne CO_{2eq.2017}) of sequestration is faster than the increase in the relative metric of biogenic CO₂ emissions. Sequestration allows -2 E6 tonne CO_{2eq.2017} after 70 years and -3 E6 tonne CO_{2eq.2017} after 243 years. And the emission of biogenic CO₂ causes +2 E6 tonne CO_{2eq.2017} after 123 years and +3 E6 tonne CO_{2eq.2017} over 463 years. As equation 5. 13 shows, the time lag reverses this logic between the inventory and the impact.

ANNEXE D : Documents supplémentaires – chapitre 5

This supporting information presents the contribution of the GHGs (excepted the biogenic CO₂ that is sequestered and emitted at the end-of-life).

SimaPro 9.2.0.2 is the software that performed the contributions analyses of the GHGs.

Calculation:	Analyze
Results:	Inventory
Indicator:	Characterization
Compartment:	Air
Per sub-compartment:	No
Skip unused:	No
Cut-off:	0.1 %
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Sorted on item:	Substance
Sort order:	Ascending

Tableau D. 1 : CLT - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.59E+08	3.68E+08	8.31E+08
	Remaining substances		223064.81	517421.8	1168746.2
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.34E+08	3.11E+08	7.03E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	5098279.6	11825985	26712394
3	Methane, biogenic		431720.8	1001420.9	2261997.5
4	Methane, fossil		18586050	43112258	97381456
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	85%	85%	85%
Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.46E+08	3.39E+08	7.67E+08
	Remaining substances	kg CO ₂	373367.09	866063.42	1956253.8
1	Carbon dioxide, fossil	eq	1.34E+08	3.11E+08	7.03E+08
2	Dinitrogen monoxide		5117591.3	11870780	26813577
3	Methane, fossil		6637875.1	15397235	34779091
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	92%	92%	92%
Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.39E+08	3.23E+08	7.30E+08
	Remaining substances		119600.46	277425.59	626645.63
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.34E+08	3.11E+08	7.03E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	2529828.1	5868196.9	13255013
3	Methane, fossil		2339578.9	5426894.3	12258204
4	Sulfur hexafluoride		189257.44	439002.13	991612.79
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%

Tableau D. 2 : Acier déplacé scénario de référence - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		5.99E+08	1.39E+09	3.14E+09
	Remaining substances		604886.56	1403096.7	3169298.1
1	Carbon dioxide, fossil		4.66E+08	1.08E+09	2.44E+09
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	815852.63	1892454.2	4274653
3	Dinitrogen monoxide	eq	1769123.1	4103663.1	9269305.5
4	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22		1290047	2992396.9	6759190.6
5	Methane, fossil		1.28E+08	2.98E+08	6.73E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	78%	78%	78%
Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		5.15E+08	1.19E+09	2.70E+09
	Remaining substances		950188.43	2204059.9	4978504.3
1	Carbon dioxide, fossil		4.66E+08	1.08E+09	2.44E+09
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	815852.63	1892454.2	4274653
3	Dinitrogen monoxide	eq	1775824.3	4119207.3	9304416.5
4	Methane, fossil		45882117	1.06E+08	2.40E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	91%	91%	91%
Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		4.84E+08	1.12E+09	2.54E+09
	Remaining substances		224843.08	521546.69	1178063.5
1	Carbon dioxide, fossil		4.66E+08	1.08E+09	2.44E+09
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	815852.63	1892454.2	4274653
3	Dinitrogen monoxide	eq	877860.31	2036287.4	4599541.8
4	Methane, fossil		16171566	37511612	84730784
5	Sulfur hexafluoride		498310.88	1155883.4	2610895.7
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%

Tableau D. 3 : Acier déplacé scénario conservateur - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.30E+08	3.02E+08	6.82E+08
	Remaining substances		100963.53	234195.3	528997.55
1	Carbon dioxide, fossil		1.01E+08	2.33E+08	5.27E+08
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	180704.33	419162.29	946798.79
3	Dinitrogen monoxide	eq	364524.16	845551.33	1909921.3
4	Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22		299658.65	695089.11	1570059
5	Methane, fossil		28604123	66350208	1.50E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	77%	77%	77%

Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.12E+08	2.59E+08	5.84E+08
	Remaining substances		196504.24	455811.83	1029582.3
1	Carbon dioxide, fossil		1.01E+08	2.33E+08	5.27E+08
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	180704.33	419162.29	946798.79
3	Dinitrogen monoxide	eq	365904.93	848754.17	1917155.8
4	Methane, fossil		10215758	23696503	53525378
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	90%	90%	90%

Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.05E+08	2.43E+08	5.49E+08
	Remaining substances		145243.32	336906.84	761001.17
1	Carbon dioxide, fossil		1.01E+08	2.33E+08	5.27E+08
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂	180704.33	419162.29	946798.79
3	Dinitrogen monoxide	eq	180881.31	419572.82	947726.08
4	Methane, fossil		3600636	8352046.1	18865502
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%

Tableau D. 4 : Béton déplacé scénario de référence - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.62E+08	3.76E+08	8.48E+08
	Remaining substances		327731.29	760206.01	1717143.9
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.44E+08	3.35E+08	7.56E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	477795.45	1108295.1	2503403.1
3	Methane, fossil		16851866	39089614	88295134
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	89%	89%	89%

Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.51E+08	3.50E+08	7.91E+08
	Remaining substances		192305.93	446073.15	1007584.5
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.44E+08	3.35E+08	7.56E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	479605.28	1112493.2	2512885.7
3	Methane, fossil		6018523.5	13960577	31533976
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%

Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
	Total of all compartments		1.47E+08	3.40E+08	7.69E+08
	Remaining substances		163156.82	378458.82	854858.06
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.44E+08	3.35E+08	7.56E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	237087.9	549949.45	1242219
3	Methane, fossil		2121282.9	4920531.1	11114434
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	98%	98%	98%

Tableau D. 5 : Béton déplacé scénario conservateur - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
1	Total of all compartments	kg CO ₂	6917171	16045563	36243256
	Remaining substances		13580.883	31503.186	71158.489
	Carbon dioxide, fossil		6188815.2	14356017	32426958
	Dinitrogen monoxide		21429.023	49708.29	112279.65
	Methane, fossil		693345.9	1608334.6	3632859.9
<i>Carbon dioxide, fossil</i>		%	89%	89%	89%
Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
1	Total of all compartments	kg CO ₂	6465761	14998440	33878045
	Remaining substances		7812.0715	18121.438	40932.183
	Carbon dioxide, fossil		6188815.2	14356017	32426958
	Dinitrogen monoxide		21510.193	49896.579	112704.96
	Methane, fossil		247623.54	574405.22	1297450
<i>Carbon dioxide, fossil</i>		%	96%	96%	96%
Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2017	Total 2030	Total 2050
1	Total of all compartments	kg CO ₂	6293276.9	14598334	32974296
	Remaining substances		6551.2126	15196.66	34325.778
	Carbon dioxide, fossil		6188815.2	14356017	32426958
	Dinitrogen monoxide		10633.341	24665.856	55714.525
	Methane, fossil		87277.148	202454.3	457297.93
<i>Carbon dioxide, fossil</i>		%	98%	98%	98%

Tableau D. 6 : Fin de vie 1 : Chaleur & électricité (production d'éoliennes évitées par l'électricité générée) - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		15883753	36844002	83222794
	Remaining substances		4426.2241	10267.083	23191.164
1	Carbon dioxide, fossil		13025439	30213848	68246681
2	Carbon dioxide, land transformation		-17398.232	-40356.991	-91157.892
3	Dinitrogen monoxide		2364813.2	5485427.7	12390419
4	Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg CO ₂ eq	17687.155	41027.178	92671.701
5	Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113		16250.647	37695.049	85145.129
6	Methane, biogenic		432276.54	1002710	2264909.4
7	Methane, fossil		67762.996	157183.25	355043.65
8	Sulfur hexafluoride		-27504.41	-63799.311	-144109.13
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	82%	82%	82%

Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		15537879	36041710	81410586
	Remaining substances		23662.041	54886.541	123977.07
1	Carbon dioxide, fossil		13025439	30213848	68246681
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂ eq	-17398.232	-40356.991	-91157.892
3	Dinitrogen monoxide		2373770.8	5506205.8	12437352
4	Methane, biogenic		145138.22	336663.06	760450.51
5	Methane, fossil		24201.07	56136.874	126801.3
6	Sulfur hexafluoride		-36934.493	-85673.361	-193517.97
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	84%	84%	84%

Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		14189767	32914627	74347167
	Remaining substances		15959.195	37018.997	83618.071
1	Carbon dioxide, fossil		13025439	30213848	68246681
2	Carbon dioxide, land transformation	kg CO ₂ eq	-17398.232	-40356.991	-91157.892
3	Dinitrogen monoxide		1173449	2721935.7	6148276
4	Methane, biogenic		41841.65	97056.016	219228.98
5	Sulfur hexafluoride		-49523.654	-114875.22	-259478.78
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	92%	92%	92%

Tableau D. 7 : Fin de vie 2 : Chaleur & électricité (Gaz naturel évité par chaleur & électricité générés) - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		-2.73E+08	-6.32E+08	-1.43E+09
	Remaining substances		-157069.54	-364338.99	-822964.57
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	-2.00E+08	-4.65E+08	-1.05E+09
2	Dinitrogen monoxide	eq	1698882.3	3940732.5	8901279.7
3	Methane, biogenic		400623.24	929286.86	2099062.1
4	Methane, fossil		-74219477	-1.72E+08	-3.89E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	73%	73%	73%

Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		-2.25E+08	-5.22E+08	-1.18E+09
	Remaining substances		85266.984	197785.55	446755.65
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	-2.00E+08	-4.65E+08	-1.05E+09
2	Dinitrogen monoxide	eq	1705317.5	3955659.5	8934996.6
3	Methane, fossil		-26506956	-61485614	-1.39E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	89%	89%	89%

Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		-2.09E+08	-4.84E+08	-1.09E+09
	Remaining substances		23520.644	54558.557	123236.22
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	-2.00E+08	-4.65E+08	-1.05E+09
2	Dinitrogen monoxide	eq	843005.99	1955439.2	4416922.9
3	Methane, fossil		-9342615.6	-21671159	-48950557
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%

Tableau D. 8 : Fin de vie 3 : Panneaux particules (Pas d'évitement) - analyse de contribution des GES

Method: IPCC 2013 GWP 20a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		1.39E+08	3.22E+08	7.26E+08
	Remaining substances		264722.35	614050.75	1387010.5
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.10E+08	2.56E+08	5.77E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	706462.07	1638711.5	3701502.1
3	Methane, fossil		27486113	63756870	1.44E+08
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	79 %	79 %	79 %

Method: IPCC 2013 GWP 100a V1.03					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		1.21E+08	2.80E+08	6.34E+08
	Remaining substances		211500.55	490597.31	1108155.4
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.10E+08	2.56E+08	5.77E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	709138.06	1644918.8	3715523
3	Methane, fossil		9816469	22770311	51433307
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	91%	91%	91%

Method: IPCC 2013 GWP 500a V1.01					
No	Substance	Unit	Total 2087	Total 2100	Total 2120
	Total of all compartments		1.14E+08	2.65E+08	5.98E+08
	Remaining substances		108508.65	251696.99	568530.16
1	Carbon dioxide, fossil	kg CO ₂	1.10E+08	2.56E+08	5.77E+08
2	Dinitrogen monoxide	eq	350555.04	813148.52	1836730.2
3	Methane, fossil		3459903	8025601.4	18128133
4	Sulfur hexafluoride		117432.29	272396.29	615285.51
	<i>Carbon dioxide, fossil</i>	%	96%	96%	96%