

# ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) ENVIRONNEMENTALE COMPARATIVE DE LA CONSTRUCTION DE BÂTIMENTS DE GRANDE HAUTEUR EN BOIS MASSIF ET EN BÉTON

PARTENAIRES FINANCIERS

*Forêts, Faune  
et Parcs*

Québec 

  
Fondsvert

Gatien Geraud Essoua Essoua, Ph.D.

Patrick Lavoie, MBA, M.A

Octobre 2019

Commissionné par :

Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du  
Québec (MFFP)

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs et le Fonds Vert pour soutenir le développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone.

**ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) ENVIRONNEMENTALE  
COMPARATIVE DE LA CONSTRUCTION DE BÂTIMENTS  
DE GRANDE HAUTEUR EN BOIS MASSIF ET EN BÉTON**

**PROJET NUMÉRO : 301013611**

**APPROBATEUR**  
Vincent Blanchard, M.A, MBA  
Gestionnaire  
Groupe Affaires Réglementaires  
Vincent.Blanchard@fpinnovations.ca

**RÉVISEUR**  
François Charron-Doucet, Ing. M.Sc. A.  
Directeur scientifique  
Responsabilité d'entreprise  
Groupe AGÉCO

**AUTEUR**  
Gatien Geraud Essoua Essoua, Ph.D.  
Chercheur  
Groupe Affaires Réglementaires  
418-781-6730  
Geraud.Essoua@fpinnovations.ca

## AVERTISSEMENT

FPInnovations ne donne aucune indication ni garantie à quiconque (personne ou entité) quant à l'exactitude, à la rectitude ou à l'exhaustivité de l'information, des données ou de l'analyse de l'information ou des données contenues dans le présent rapport, et ne fournit aucune recommandation, indication ni garantie de quelque nature que ce soit concernant le présent rapport.

Suivez-nous :   

## SOMMAIRE

Cette étude présente l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), du berceau au tombeau, de deux bâtiments fonctionnellement équivalents (bois versus béton). L'objectif de cette étude était de comparer leurs profils environnementaux. Chaque bâtiment comporte 8 étages avec une surface de plancher totale de 13 776 m<sup>2</sup>. La comparaison est effectuée sur la base d'un cycle de vie de 60 ans. Les étapes analysées sont la production, la construction, l'opération et la fin de vie, avec l'enfouissement et l'incinération comme scénarios d'élimination des déchets. Le bâtiment de référence considéré est le bâtiment C du projet Arbora actuellement en construction. La structure de ce bâtiment est construite principalement en bois d'ingénierie (CLT et bois lamellé-collé). Le bâtiment est fonctionnellement équivalent à un bâtiment hypothétique dont la structure est en béton et acier. Ce dernier est conçu selon les pratiques courantes de construction et les paramètres généraux du bâtiment de référence (bâtiment C du projet Arbora). Dans cette étude, il a été considéré que les deux bâtiments sont localisés sur le même site. Ceci, afin de ne pas altérer les distances de transports analysées, d'un bâtiment à l'autre. À cette fin, la localisation commune est celle du bâtiment de référence construit dans le quartier Griffintown, au centre-ville de Montréal.

Le bâtiment de référence (bâtiment en bois) présente une structure en béton au rez-de-chaussée (RDC) et une structure en bois d'ingénierie du 2<sup>e</sup> au 8<sup>e</sup> étage, tandis que le bâtiment en béton présente une structure en béton, du RDC au 8<sup>e</sup> étage. La composition des systèmes d'enveloppes est similaire pour les deux bâtiments. Cependant, en matière de quantité des matériaux de construction utilisés, il existe des différences importantes entre les deux bâtiments. Ces différences sont liées à plusieurs facteurs :

- La résistance au feu des matériaux de construction en bois
- La performance acoustique des planchers en CLT
- La baisse de la hauteur des plafonds pour l'installation de la mécanique du bâtiment, dans le bâtiment en bois
- L'absence d'isolants en pente au niveau de la toiture du bâtiment en béton

Les inventaires des données primaires (ex. modèle BIM) et secondaires (ex. bases de données et littérature scientifique) ont été réalisés. Le logiciel de modélisation utilisé est SimaPro v 8.0. Les différentes bases de données utilisées pour la modélisation des différents proxies sont ECOINVENT 3 et USLCI. La méthode d'analyse des impacts considérés est la méthode nord-américaine TRACI 2.1 v 2.04. La méthode européenne IMPACT 2002+ v 2.14 est utilisée pour valider les résultats obtenus avec la méthode TRACI. Cinq (5) catégories d'impacts ont été analysées avec une attention particulière sur la catégorie «*Réchauffement climatique*».

Au cours de l'étude, différents paramètres sensibles ont été identifiés et analysés. Les paramètres choisis ainsi que les justificatifs sont présentés dans le Tableau 1 ci-dessous. Les différents scénarios et sensibilités comparés sont présentés dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 1. Paramètres sensibles analysés

Types	Paramètres sensibles	Justificatifs	Application
Sensibilité 1	Acier dans les murs	Plus de 70 % de l'acier du bâtiment en bois se localise dans les cloisons et l'enveloppe	Remplacement du colombage en acier par le colombage en bois (2x4)
Sensibilité 2	Acier, aluminium et gypse dans les plafonds	Quantité additionnelle de matériaux dans les plafonds du bâtiment en bois	Égale quantité de matériaux dans les plafonds du bâtiment en béton
Sensibilité 3	Différence de 6 pouces de hauteur	Quantité additionnelle de matériaux dans le bâtiment en bois	Égale quantité de matériaux dans l'enveloppe, les cloisons, les plafonds et les escaliers dans le bâtiment en béton
Sensibilité 4	Volume béton et armature	Impact GES production béton	+25 % volume béton et armature
Sensibilité 5	Volume béton et armature	Impact GES production béton	-25 % volume béton et armature

Tableau 2. Scénarios et sensibilités analysés

Id	Types	Description
A	Structure	Structure du bâtiment de référence
B	Structure	Structure du bâtiment équivalent béton/acier
C	Scénario 1	Scénario référence (bâtiment Arbora C)
D	Scénario 2	Scénario alternatif (bâtiment équivalent en béton/acier)
E	Sensibilité 1	Bâtiment Arbora C avec colombage en bois (2x4)
F	Sensibilité 2	Superficie plafond égale dans le bâtiment béton
G	Sensibilité 3	Enveloppe, plafonds, cloisons et escaliers égaux dans le bâtiment béton/acier
H	Sensibilité 4	+ 25 % de béton/acier dans le bâtiment équivalent en béton/acier
I	Sensibilité 5	- 25 % de béton/acier dans le bâtiment équivalent en béton/acier

Les résultats obtenus de la comparaison des profils environnementaux des deux bâtiments indiquent que les impacts sur l'environnement du cycle de vie complet du bâtiment en bois sont inférieurs comparés à ceux du bâtiment en béton. Ce faible profil environnemental se vérifie pour toutes les catégories d'impacts analysées. Les différences relatives entre le bâtiment en bois et celui en béton varient de 22% à 6% en fonction de la catégorie d'impact considérée. Ces différences relatives sont non significatives exceptés pour la catégorie changement climatique au regard des seuils définis par Humbert et al., en 2013 (Humbert et al., 2013). En effet, pour la catégorie réchauffement climatique, le bâtiment en bois génère 20% moins d'émission de GES que le bâtiment en béton/acier. Ceci se traduit en des émissions évitées de 1,8 kt éq. CO<sub>2</sub> (Figure 1).

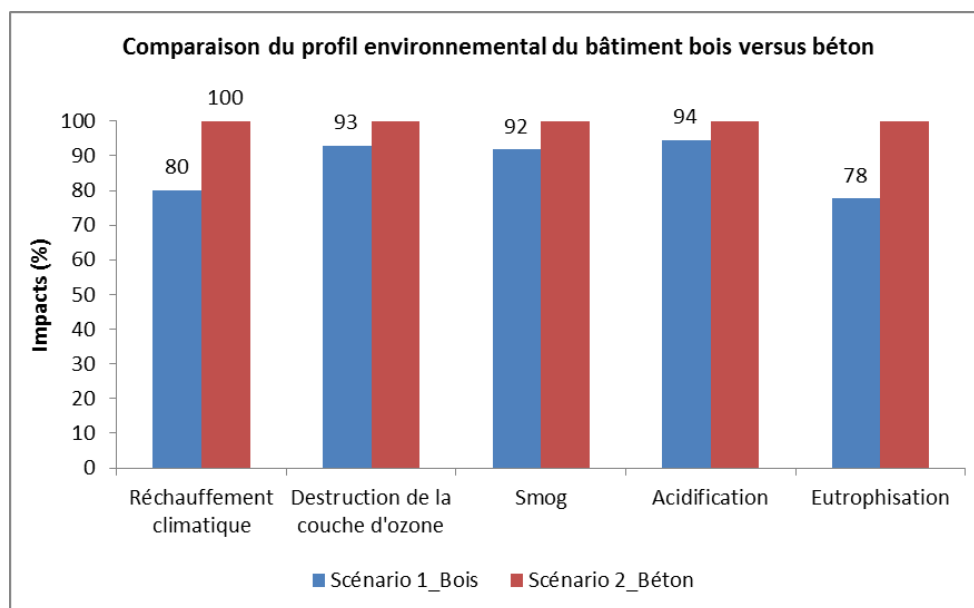


Figure 1. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton

L'analyse des structures des bâtiments montre que la structure en bois d'ingénierie produit 65 % moins d'émissions de GES que la structure en béton. Ceci se traduit en des émissions de GES évitées de 4,4 kt éq. CO<sub>2</sub>. Les impacts sur les résultats suite aux variations des paramètres sensibles sont ci-dessous présentés :

- Scénario 1 versus Sensibilité 1 : les variations des impacts autour des résultats sont de 13 % pour la catégorie changement climatique dans le cas du bâtiment en bois.
- Scénario 1 versus Sensibilité 2 : les variations des impacts autour des résultats sont de 1 % pour la catégorie changement climatique dans le cas du bâtiment en bois.
- Scénario 1 versus Sensibilité 3 : les variations des impacts autour des résultats sont de 5 % pour la catégorie changement climatique dans le cas du bâtiment en bois.
- Scénario 1 versus Sensibilité 4 : les variations des impacts autour des résultats sont de 8 % pour la catégorie changement climatique dans le cas du bâtiment en bois.
- Scénario 1 versus Sensibilité 5 : les variations des impacts autour des résultats sont de -8 % pour la catégorie changement climatique dans le cas du bâtiment en bois.

Dans ce cas d'analyse, malgré la considération des spécificités liées à la réglementation de la régie du bâtiment du Québec (RBQ) et au code national du bâtiment (CNB) qui favorisent l'utilisation de plus de matériaux dans le bâtiment en bois, ce dernier présente tout de même un meilleur profil environnemental, comparé au bâtiment en béton/acier. La considération et l'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone, comme les produits de bois (d'ingénierie ou non) dans le bâtiment sont des opportunités concrètes de réduction de l'empreinte carbone pour l'industrie du bâtiment dans sa globalité.

# TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	I
ACRONYMES.....	IX
1. INTRODUCTION.....	1
2. L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE.....	1
3. OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	2
3.1 Hypothèse.....	2
3.2 Raison d'être de l'étude.....	2
3.3 Applications.....	2
3.4 Importance et pertinence.....	3
3.5 Auditoire visé.....	3
4. PORTÉE DE L'ÉTUDE.....	3
4.1 Description des bâtiments.....	3
4.2 Description technique des bâtiments.....	5
4.3 Adaptation des bâtiments.....	6
4.4 Fonction et unité fonctionnelle.....	7
4.5 Frontières du système à l'étude.....	7
4.6 Critères de « <i>cut-off</i> ».....	10
4.7 Qualité et type de données.....	10
4.8 Procédures d'allocation.....	10
4.9 Méthode d'analyse des impacts.....	12
4.9.1 Changements climatiques.....	13
4.9.2 Appauvrissement de la couche d'ozone.....	13
4.9.3 Eutrophisation.....	13
4.9.4 Acidification.....	14
4.9.5 Smog photochimique.....	14
4.9.6 Interprétation des résultats.....	14
4.9.7 Processus de revue critique.....	14
5. INVENTAIRES DU CYCLE DE VIE (ICV).....	14
5.1 Inventaire des matériaux.....	15
5.2 L'étape de production.....	17
5.2.1 Extraction, Transport et Production (A1, A2 et A3).....	17
5.3 L'étape de la construction.....	18
5.3.1 Transport (A4).....	18
5.3.2 Construction (A5).....	20
5.4 Opération du bâtiment.....	23

5.4.1	Réparation (B3) .....	23
5.4.2	Remplacement (B4) .....	23
5.4.3	Besoin en énergie (B6) .....	24
5.4.4	Besoin en eau (B7) .....	25
5.5	La fin de vie du bâtiment .....	26
5.5.1	La démolition (C1) .....	26
5.5.2	Le transport (C2) .....	28
5.5.3	Le tri/séparation (C3) .....	28
5.5.4	La gestion des déchets (C4) .....	28
5.6	Description des analyses de sensibilités .....	30
6.	ANALYSE DES IMPACTS ACV .....	31
6.1	Analyse de la qualité des données et processus modélisé .....	31
6.2	Analyse de la qualité des données .....	31
6.3	Effets des incertitudes sur les résultats .....	35
7.	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION .....	36
7.1	Comparaison – Scénario 1 versus Scénario 2 .....	36
7.2	Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie des bâtiments .....	39
7.3	Analyse des émissions de GES attribuables à la production des matériaux .....	40
7.4	Impacts de l’analyse de sensibilité 1 sur les résultats .....	43
7.4.1	Analyse de sensibilité autour du processus de modélisation issus de la base ELCD et Écoinvent ..	44
7.5	Impacts de l’analyse de sensibilité 2 sur les résultats .....	44
7.6	Impacts de l’analyse de sensibilité 3 sur les résultats .....	45
7.7	Impacts de l’analyse de sensibilité 4 sur les résultats .....	46
7.8	Impacts de l’analyse de sensibilité 5 sur les résultats .....	47
8.	DISCUSSION .....	49
9.	CONCLUSIONS .....	52
10.	RECOMMANDATIONS .....	52
11.	LIMITES DE L’ÉTUDE .....	53
12.	RÉFÉRENCES .....	54
	ANNEXE I – ARBRE DE PROCESSUS DU BÂTIMENT EN BOIS ET ÉMISSION DES GES .....	58
	ANNEXE II – ARBRE DE PROCESSUS DU BÂTIMENT EN BÉTON ET ÉMISSION DES GES .....	60
	ANNEXE III – INVENTAIRE ET PROCESSUS DE MODÉLISATION DES BÂTIMENTS ANALYSÉS .....	62
	ANNEXE IV – INVENTAIRE ET PROCESSUS DE MODÉLISATION DES STRUCTURES DES BÂTIMENTS ANALYSÉS ..	66
	ANNEXE V – REGROUPEMENT DES MATÉRIAUX .....	68
	ANNEXE VI – INVENTAIRE SENSIBILITÉ 1 : REMPLACEMENT DU COLOMBAGE EN ACIER LÉGER PAR LE COLOMBAGE EN BOIS D’ŒUVRE (2*4) .....	70

ANNEXE VII – INVENTAIRE SENSIBILITÉ 2 : ÉGALE QUANTITÉ DE MATÉRIAUX DANS LES PLAFONDS DU BÂTIMENT EN BÉTON COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN BOIS .....	73
ANNEXE VIII – INVENTAIRE SENSIBILITÉ 3 : ÉGALE QUANTITÉ DE MATÉRIAUX DANS LES PLAFONDS, ENVELOPPE, CLOISONS ET ESCALIERS DU BÂTIMENT EN BÉTON COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN BOIS .....	76
ANNEXE IX – INVENTAIRE SENSIBILITÉ 4 : AJOUT DE 25 % DE VOLUME DE BÉTON ET D’ACIER DANS LE BÂTIMENT EN BÉTON COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN BOIS .....	79
ANNEXE X – RAPPORT FINAL DE REVUE CRITIQUE GROUPE AGÉCO .....	82



## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton .....	iii
Figure 2.	Les étapes de l'ACV .....	2
Figure 3.	Illustration 3D du bâtiment C du projet Arbora, en étude .....	4
Figure 4.	Illustration 3D du bâtiment équivalent du point de vue fonctionnel, construit en béton .....	4
Figure 5.	Détails de l'assemblage colonne-dalle (bois-béton) et poutre-colonne (bois-bois).....	5
Figure 6.	Les frontières du système analysé incluant et excluant les différents modules associés (Inspiré de : EN 15 978 : 2012).....	8
Figure 7.	Distance d'approvisionnement des principaux matériaux de construction .....	19
Figure 8.	Distance de transport des matériaux de construction des fournisseurs vers le site de construction .....	20
Figure 9.	Consommation moyenne d'eau dans le secteur résidentiel .....	26
Figure 10.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton; analysés avec la méthode TRACI.....	37
Figure 11.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton; analysés avec la méthode Impacts 2002+ .....	38
Figure 12.	Comparaison des impacts environnementaux : structure en bois versus structure en béton .....	39
Figure 13.	Contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment en bois.....	40
Figure 14.	Contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment en béton.....	40
Figure 15.	Comparaison des émissions de GES des de la production des matériaux de construction .....	42
Figure 16.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois avec colombage en bois versus bâtiment en béton.....	43
Figure 17.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois avec colombage en bois versus bâtiment en béton (processus de production du bois d'œuvre provient de la base de données Écoinvent) .....	44
Figure 18.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec égale superficie de plafond couverte. ....	45
Figure 19.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec l'hypothèse d'égalité au niveau de l'enveloppe, superficie plafond couverte, cloisons et escaliers.....	46
Figure 20.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec +25 % du volume de béton et armature.....	47
Figure 21.	Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec -25 % du volume de béton et armature .....	48
Figure 22.	Projection des émissions de carbone dans le bâtiment du point de vue but et allocation (Zizzo, Kyriazis et Goodland 2017) .....	51

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Paramètres sensibles analysés.....	ii
Tableau 2.	Scénarios et sensibilités analysés .....	ii
Tableau 3.	Liste des principaux matériaux .....	6
Tableau 4.	Composantes des bâtiments incluses dans l'analyse .....	8
Tableau 5.	Composantes des bâtiments exclues de l'analyse (bâtiment bois-bâtiment béton) .....	9
Tableau 6.	Catégories d'impacts et unités respectives .....	13
Tableau 7.	Pourcentages de réduction des différentes hauteurs .....	15
Tableau 8.	Inventaire des matériaux de construction.....	16
Tableau 9.	Consommation énergétique en phase de construction .....	21
Tableau 10.	Pourcentage et quantité de déchets générés.....	21
Tableau 11.	Liste des matériaux nécessaires à la réparation .....	23
Tableau 12.	Quantité de matériaux à remplacer pendant 60 ans de durée de vie pour les deux bâtiments.....	24
Tableau 13.	Consommation en énergie des bâtiments.....	25
Tableau 14.	Consommation en eau des différents espaces des bâtiments .....	26
Tableau 15.	Énergie de déplacement des équipements de démolition.....	27
Tableau 16.	Énergie de démolition.....	27
Tableau 17.	Énergie de tri des matériaux .....	28
Tableau 18.	Types et taux (%) de gestion de déchets .....	29
Tableau 19.	Quantité de déchets recyclables après la démolition.....	30
Tableau 20.	Paramètres sensibles analysés.....	31
Tableau 21.	Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al. 1996).....	32
Tableau 22.	Critères évaluation qualitative de la qualité des données (adaptés de Weidema et al. 1996) .....	32
Tableau 23.	Sources des données primaires d'inventaire du cycle de vie .....	32
Tableau 24.	Sources des données secondaires d'inventaire du cycle de vie .....	33
Tableau 25.	Analyse de la qualité des données primaires .....	34
Tableau 26.	Analyse de la qualité des données secondaires .....	34
Tableau 27.	Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative (Humbert et al. 2013).....	35
Tableau 28.	Scénarios et sensibilités analysés .....	36
Tableau 29.	Différence massique des matériaux utilisés dans les deux bâtiments .....	50

## ACRONYMES

ACV :	Analyse du cycle de vie
CLT :	Cross-Laminated Timber ou « bois lamellé-croisé »
ISO :	International Organization for Standardization
MFFP :	Ministère de la Forêt de la Faune et des Parcs
MELCC :	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements Climatiques
BA :	Béton / Acier
ILCD :	International Reference of Life Cycle Data system
EN :	Normes européennes
RDC :	Rez-de-chaussée
BIM :	Building Information Modeling
OSB :	Oriented Strand Board ou « panneaux de lamelles orientées »

## 1. INTRODUCTION

L'industrie de la construction est un important levier de l'économie nationale québécoise. Au Canada, elle représente 7 % du produit intérieur brut (PIB) et crée 1 emploi sur 13 (ConstruForce Canada 2017). Au Québec, cette industrie représente 12 % du PIB, soit 46,8 milliards \$ et 245 800 emplois directs. (Commission de la construction du Québec 2017). En dehors du cadre économique, cette industrie est aussi importante du point de vue environnemental. En effet, l'opération des bâtiments est responsable de 16 % des émissions de GES au Québec (Environment and Climate Change Canada 2018, National Energy Board 2018).

Le gouvernement du Québec, dans sa politique de réduction des émissions de GES a mis en place un Plan d'Action sur les Changements Climatiques (PACC). Tous les secteurs d'activité sont appelés à contribuer à ce plan d'action (Gouvernement de Québec 2012). De ce fait, le présent projet de recherche s'inscrit dans un effort de développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone (mesure 19.4.3 du PACC 2013-2020), dont les résultats et recommandations pourront contribuer à l'atteinte des objectifs gouvernementaux.

Du point de vue environnemental, un matériau biosourcé n'est pas toujours synonyme de faible empreinte environnementale, en comparaison à un matériau issu de sources non renouvelables (Gustafsson and Borjesson, 2007 and Tufvesson and Borjesson, 2008). Il est donc pertinent de mener une analyse rigoureuse afin de mettre en relief le profil environnemental d'un produit ou matériau. Des analyses de cycle de vie des bâtiments de moyenne et grande hauteur démontrent la performance environnementale supérieure des bâtiments en bois, comparativement aux bâtiments en béton et/ou en acier (Grann, 2013; Durlinger et al. 2013; Robertson et al. 2012).

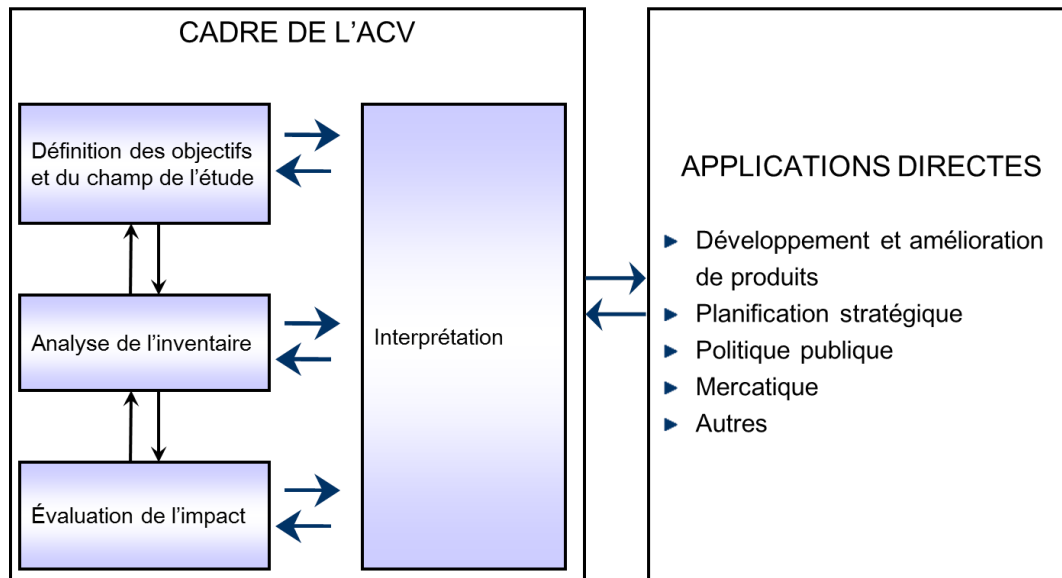
En comparaison aux études précédentes, la présente étude se différencie sur plusieurs points :

- Le bâtiment analysé fait partie du projet Arbora qui est un projet de construction bois d'envergure important en Amérique du Nord. Avec une surface de plancher de 597 560 pieds carrés, il est le premier bâtiment de grande hauteur en bois d'ingénierie construit en sol montréalais.
- La considération des spécificités du code du bâtiment en matière de performance acoustique et résistance au feu permettent d'évaluer le bilan d'un système de construction intégrant autant la structure que l'enveloppe de bâtiment.

Cette étude d'analyse de cycle de vie comparative a été réalisée en conformité aux les normes ISO 14040/44 (2006). Elle analyse et compare l'empreinte carbone des bâtiments et identifie les étapes du cycle de vie qui contribuent de manière importante au bilan environnemental des bâtiments. Enfin, elle identifie les paramètres sensibles et analyse leurs impacts sur les résultats obtenus.

## 2. L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un outil d'analyse critique et d'aide à la décision. Elle permet de comprendre, de quantifier et d'interpréter les flux d'énergie et de matière, ainsi que les émissions qui y sont associées dans un système défini. La série de normes ISO14040/44 (2006) décrit les principales étapes d'une ACV (Figure 2). Chacune de ces étapes est décrite et analysée dans les sections suivantes.



Source : ISO 14040-2006

Figure 2. Les étapes de l'ACV

### 3. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Cette étude a pour objectif de réaliser une ACV comparative de deux bâtiments (bois versus béton). Le but de cette comparaison est de mettre en relief les différents profils environnementaux des bâtiments étudiés et d'identifier les facteurs importants qui les influencent. Les bâtiments considérés sont :

- Le bâtiment C du projet Arbora, comprenant des logements et des espaces de commerce, construit en CLT;
- Un bâtiment fonctionnellement équivalent, dont la structure est en béton et acier.

#### 3.1 Hypothèse

L'hypothèse posée dans cette étude est la suivante : que l'utilisation du bois d'ingénierie dans le projet Arbora présente une plus faible empreinte carbone, comparativement au bâtiment en béton et acier.

#### 3.2 Raison d'être de l'étude

La raison de cette étude est liée aux enjeux du choix des matériaux de construction utilisés dans un bâtiment et leur empreinte carbone. Dans le domaine de la construction, le concept de grandeur en matière de surface est aussi intéressant que le concept de grandeur du point de vue hauteur. La réalisation en sol québécois d'un projet d'envergure en matière de surface comme Arbora (597 560 pi<sup>2</sup>), comparé aux projets Brock Commons (162 700 pi<sup>2</sup>) et Origine (107 295 pi<sup>2</sup>), suscite de l'intérêt chez les professionnels en développement durable. Parce qu'il a une structure en bois d'ingénierie, l'étude du bâtiment C du projet Arbora via une analyse de cycle de vie s'inscrit dans le cadre du développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone (bois), programme promu par le MFFP.

#### 3.3 Applications

La réalisation de cette étude comparative mettra à la disposition des acteurs du secteur de la construction, des informations sur l'empreinte carbone globale des systèmes de construction de bâtiments ayant une structure

en bois d'ingénierie. Les informations sur les émissions de GES des matériaux de construction pourront guider les professionnels dans le choix de matériaux de construction, dans le futur. Les résultats de l'analyse pourront être vulgarisés auprès du grand public afin de contribuer à sa sensibilisation et à son information sur les questions environnementales.

### **3.4 Importance et pertinence**

Être à l'avant-garde des développements dans le domaine de la construction concorde avec la vision de FPInnovations. Au cours des dernières années, FPInnovations a contribué à la réalisation de différents projets de construction en bois de grande hauteur, tels que Brock Commons (Vancouver) et Origine (Québec), en offrant son expertise dans différents champs d'activité. La réalisation en sol québécois du plus vaste projet de construction en bois d'ingénierie en Amérique du Nord, du point de vue surface (597 560 pieds carrés et 434 unités de type condos), interpelle les chercheurs en développement durable de FPInnovations et du MFFP, qui s'intéressent au développement de la construction en bois.

### **3.5 Auditoire visé**

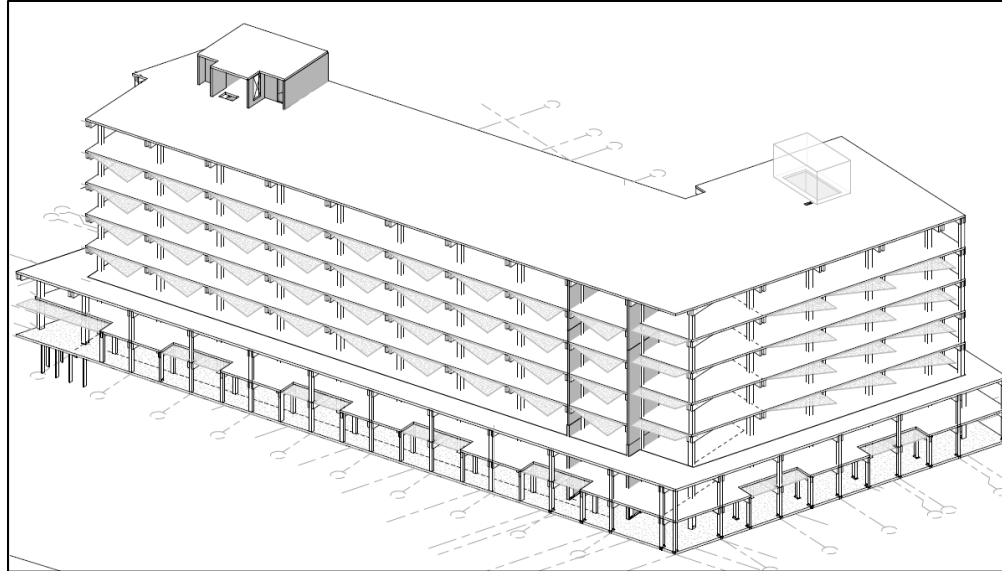
Le rapport pourrait être rendu disponible au grand public si tel est le choix du MFFP et du MELCC. Cet auditoire est considéré comme un public non technique pouvant compter des citoyens, élus municipaux, architectes, ingénieurs et autres. À cette fin, pour faciliter la compréhension et valider la conformité de l'étude aux normes ISO 14040 et 14044, les auteurs de ce rapport ont fait recours aux services de revue critique d'un expert d'une firme spécialisée en évaluations environnementales.

## **4. PORTÉE DE L'ÉTUDE**

### **4.1 Description des bâtiments**

Le projet Arbora a pour but d'offrir aux citoyens un nouveau style de logements au design novateur, confortable et près des services. C'est un projet d'envergure en bois d'ingénierie (superficie de 597 560 pi<sup>2</sup>), composé de trois (3) bâtiments (A, B et C) et est le plus haut bâtiment en bois dans la ville de Montréal. Les matériaux utilisés pour la construction de la structure et de l'enveloppe du bâtiment proviennent en totalité du Québec, tandis que ceux utilisés pour les travaux d'intérieur proviennent à 70 % du Québec et le restant, principalement des États-Unis (Sotramont, 2017).

Érigés sur 8 étages à partir du rez-de-chaussée (RDC), les bâtiments analysés présentent 2 étages au niveau sous-sol destinés au stationnement. Les 8 étages hors sol se subdivisent en logements et commerces. Le RDC est destiné aux activités commerciales tandis que les étages 2 à 8, c'est-à-dire 7 étages, sont destinés aux logements. D'une superficie brute hors sol de 13 766 m<sup>2</sup>, le bâtiment comprend 142 logements et des commerces (Source : Provencher Roy; Figure 3). Construit en bois d'ingénierie, le bâtiment cas d'étude (bâtiment C) présente des revêtements extérieurs de briques, de panneaux laminés en bois, de panneaux métalliques et des murs rideaux. Le bâtiment et son efficacité énergétique sont conçus dans l'optique d'obtention la reconnaissance LEED Platine.



Source : Provencher Roy

Figure 3. Illustration 3D du bâtiment C du projet Arbora, en étude

Le bâtiment comparable est en béton et acier, et est dessiné par le même ingénieur en structure et architecte ayant réalisé le bâtiment C de référence. Habitué aux projets de construction en béton, M. Jean-René Larose de chez L2C Experts-Conseils, a conçu la version comparable en conformité avec le Code Canadien du Bâtiment (Conseil National de Recherches Canada, 2015) et selon les pratiques normales de l'industrie. La conception du bâtiment comparable est basée sur le même concept de base et possède la même superficie et les mêmes répartitions d'espaces que le bâtiment de référence en bois (Figure 4).

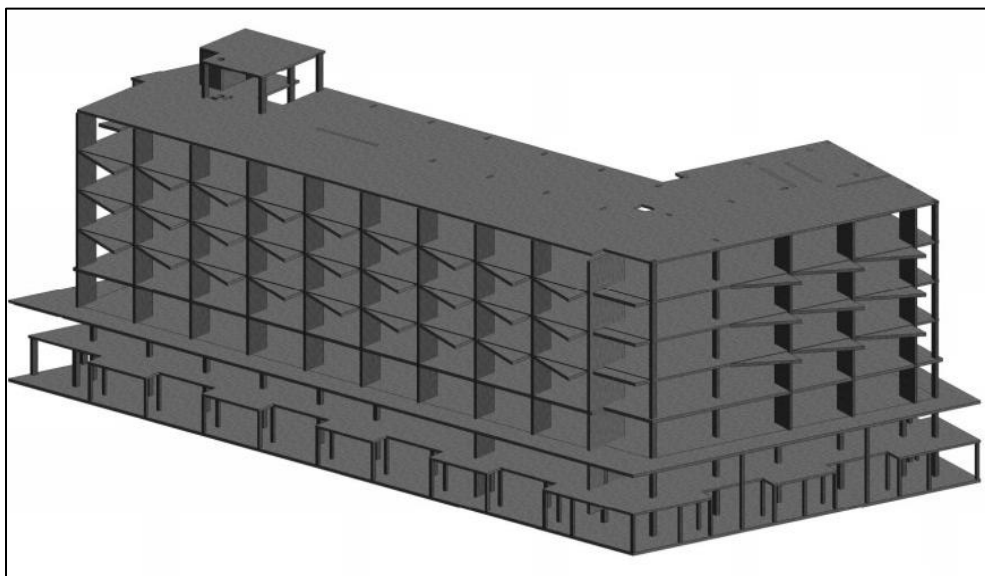


Figure 4. Illustration 3D du bâtiment équivalent du point de vue fonctionnel, construit en béton

## 4.2 Description technique des bâtiments

La structure du bâtiment C comprend des colonnes en béton et en bois lamellé-collé, des poutres en bois lamellé-collé, de dalles en béton et en *CLT*, deux cages d'escalier et une cage d'ascenseur. Il y a 286 colonnes et 260 poutres en bois; les 52 principales colonnes ont une section de 390 x 500 (mm). Sur les 3 premiers étages (RDC, 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup>), 39 colonnes de section 279 x 279 (mm) ainsi que 6 autres colonnes de 184 x 406 (mm) sont érigées au niveau des toits de la terrasse. Les poutres ont une section de 184 x 546 (mm) et une portée inter axe de 7 300 mm. Un ensemble de deux poutres se connecte de chaque côté d'une colonne à l'aide de vis auto-taraudeuses (Figure 5). Le RDC et le 2<sup>e</sup> étage présentent chacun une dalle de béton d'une épaisseur de 230 mm. Les dalles de tous les étages supérieurs (3<sup>e</sup> au 8<sup>e</sup>), y compris la toiture principale, sont en panneaux *CLT* d'une épaisseur de 175 mm. Les cages d'escalier et d'ascenseur sont érigées en panneaux *CLT*.

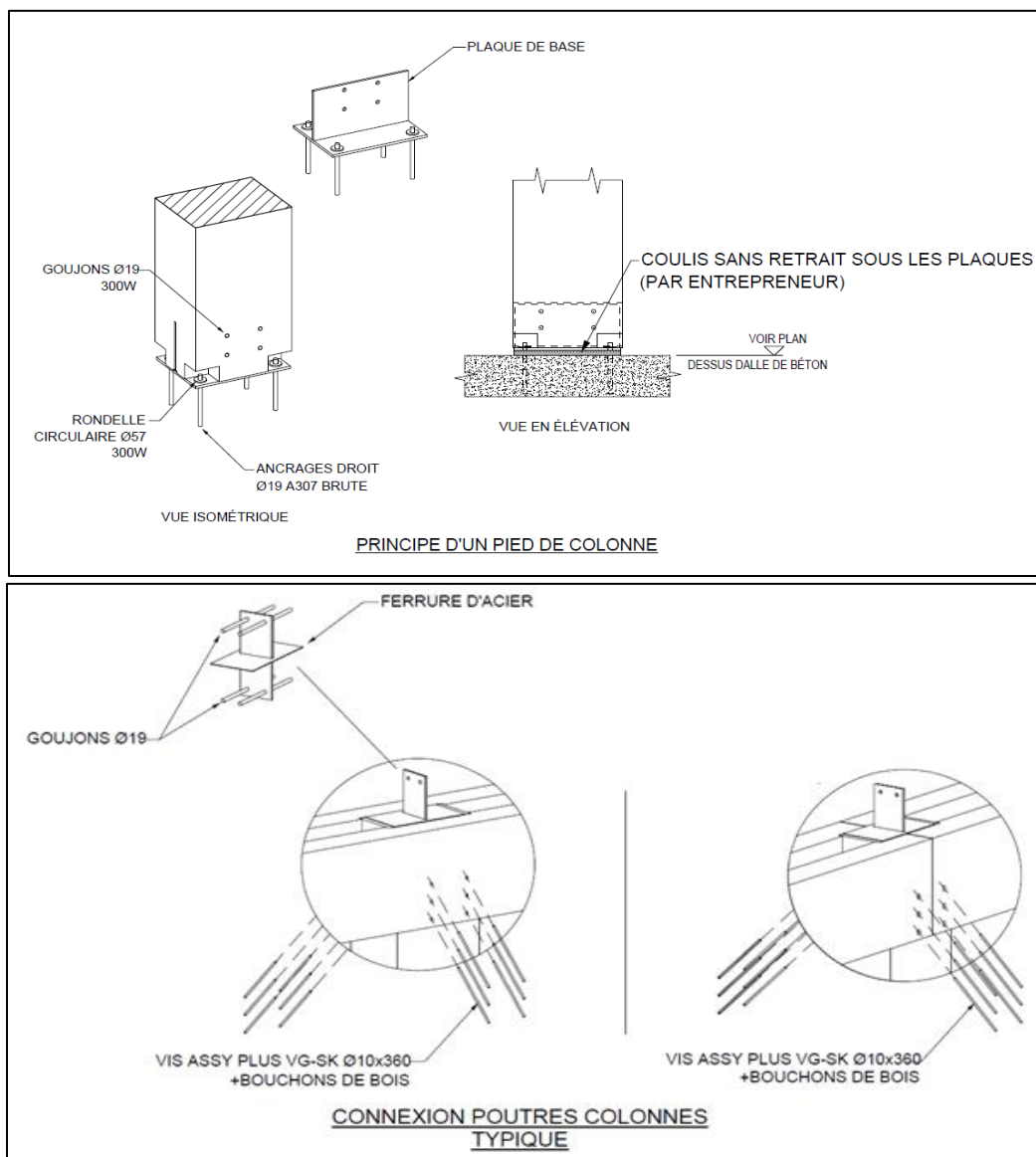


Figure 5. Détails de l'assemblage colonne-dalle (bois-béton) et poutre-colonne (bois-bois)



Du point de vue structural, le bâtiment en béton présente des colonnes, des poutres et des dalles en béton. Avec une surface brute totale de 13 766 m<sup>2</sup>, il présente un ensemble de 418 colonnes. Chaque colonne a une section constante de 300 mm x 600 mm. Les hauteurs sont de 3 900 mm (RDC et niveau 2) et de 2 900 mm pour le restant des étages. Les dalles ont une épaisseur de 230 mm, à l'exception du toit et du RDC qui sont respectivement de 275 mm et 250 mm. Chaque mur de refend a une longueur de 37 200 mm avec une épaisseur de 300 mm. Le poids de l'armature utilisée est estimé à 437 575 kg avec un volume de béton de 3 809 m<sup>3</sup>. Une liste non exhaustive des principaux matériaux utilisés pour la construction des deux bâtiments est présentée dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3. Liste des principaux matériaux

Bâtiment en bois	Bâtiment en béton
CLT	
Contreplaqué/ <i>OSB</i>	Contreplaqué/ <i>OSB</i>
Bois lamellé-collé	
Acier	Acier
Béton	Béton
Aluminium	Aluminium
Fibre de verre	Fibre de verre
Laine de roche	Laine de roche
Polystyrène extrudé/expansé	Polystyrène extrudé/expansé
Gypse	Gypse
Membrane pare-vapeur/pare-air	Membrane pare-vapeur/pare-air

### 4.3 Adaptation des bâtiments

Comme décrit précédemment, les spécificités des structures ne constituent pas les seules différences entre les bâtiments analysés. En effet, des quantités différentes de matériaux sont utilisées dans les enveloppes, les cloisons, les plafonds et les escaliers des deux bâtiments. Ces différences découlent des exigences relatives à la résistance au feu et la performance acoustique des systèmes constructifs tels que décrits ci-dessous :

- Le code du bâtiment mentionne que, les bâtiments de grande hauteur en bois peuvent avoir un faible pourcentage d'éléments structuraux en bois d'ingénierie apparent pour des raisons de résistance au feu. Ceci implique une utilisation plus importante de panneaux de gypse. Pour la même raison, les portes principales des logements sont en acier dans le bâtiment en bois tandis qu'elles peuvent être en bois dans le bâtiment en béton. Dans ce cas d'étude, les portes principales des logements des deux bâtiments ont été considérées en acier.
- Les planchers en bois lamellé-croisé n'offrent pas la possibilité d'installer la tuyauterie dans leur masse comme c'est le cas dans une dalle en béton. La tuyauterie est donc localisée dans les plafonds. Cette pratique baisse la hauteur de plafond de près de 6 pouces dans le bâtiment en bois. De ce fait, une réduction de 6 pouces de hauteur sur chaque étage, pour tous les étages dans le bâtiment en béton est appliquée dans le but d'avoir la même hauteur de plafond. Ceci porte à la baisse (4 %-5 %) les quantités de matériaux impliqués dans les murs (intérieurs, extérieurs et refend).

- Pour des raisons de performance acoustique, une chape de béton de 38 mm d'épaisseur, des panneaux isolants «Sonopan», du polythène sont installés au-dessus de la dalle en bois lamellé croisé. En dessous de celle-ci, des isolants en laine de verre sont ajoutés pour diminuer la résonance de la cavité de plafond. Les plafonds du bâtiment bois sont recouverts d'une ou double couche de panneaux de gypse, installés sur une structure en acier.
- Les isolants en pente utilisés au niveau de la toiture du bâtiment en bois sont éliminés en totalité dans l'inventaire des matériaux du bâtiment en béton, car la dalle de la toiture est coulée avec une pente.

#### 4.4 Fonction et unité fonctionnelle

La définition d'une unité fonctionnelle commune à laquelle se rapporteront les flux de matières et d'énergie répertoriés dans la phase d'inventaire est la base de la démarche de réalisation d'une ACV comparative, selon ISO 14 040 (2006). Elle est constituée de trois variables distinctes : la fonction, la grandeur et l'horizon temporel. La fonction des bâtiments étudiés est de loger des ménages et des commerces. La variable « grandeur » est la superficie plancher (exprimée en m<sup>2</sup>) tandis que la variable « horizon temps » exprime la durée (en années) pendant laquelle la fonction est maintenue. Dans cette étude, l'unité fonctionnelle commune définie est une surface plancher de 13 766 m<sup>2</sup>, remplissant de manière adéquate la fonction logement des ménages et des commerces, sur une durée de vie de 60 ans. Le bâtiment de référence se situe sur un terrain localisé au croisement des rues Eleanor, Ottawa et de la Montagne, à Montréal.

#### 4.5 Frontières du système à l'étude

Les frontières du système étudié sont représentées à la Figure 6. Le système étudié présente toutes les étapes du cycle de vie du bâtiment, conformément à la norme EN 15 978 (2012). Ces étapes sont : la production, la construction, l'opération et la fin de vie. Chaque étape principale est décomposée en modules d'analyse identifiés par des lettres de l'alphabet (A-B-C-D) comme indiqué ci-dessous.

L'étape de production inclut les modules extraction de la matière première (A1), transport de celle-ci vers les usines de transformation (A2) et fabrication des produits (A3). Après la production, suit l'étape de construction. Elle inclut les modules transport des produits fabriqués de l'usine jusqu'au chantier de construction (A4) et la construction proprement dite du bâtiment (A5). L'étape d'opération du bâtiment comprend les modules utilisation (B1), maintenance (B2), réparations (B3), remplacements (B4), rénovations (B5), consommation en énergie (B6) et consommation d'eau (B7). La dernière étape du cycle de vie est la fin de vie. Cette dernière commence par les modules démolition du bâtiment (C1), transport des déchets du site de démolition à l'entreprise de tri et séparation (C2), tri et séparation des déchets (C3) et se termine par le traitement des déchets (C4). Ce dernier module peut s'effectuer par enfouissement ou par incinération. Les bénéfices et charges des modules identifiés par la lettre D sont exclus de l'analyse parce qu'en dehors du système étudié.

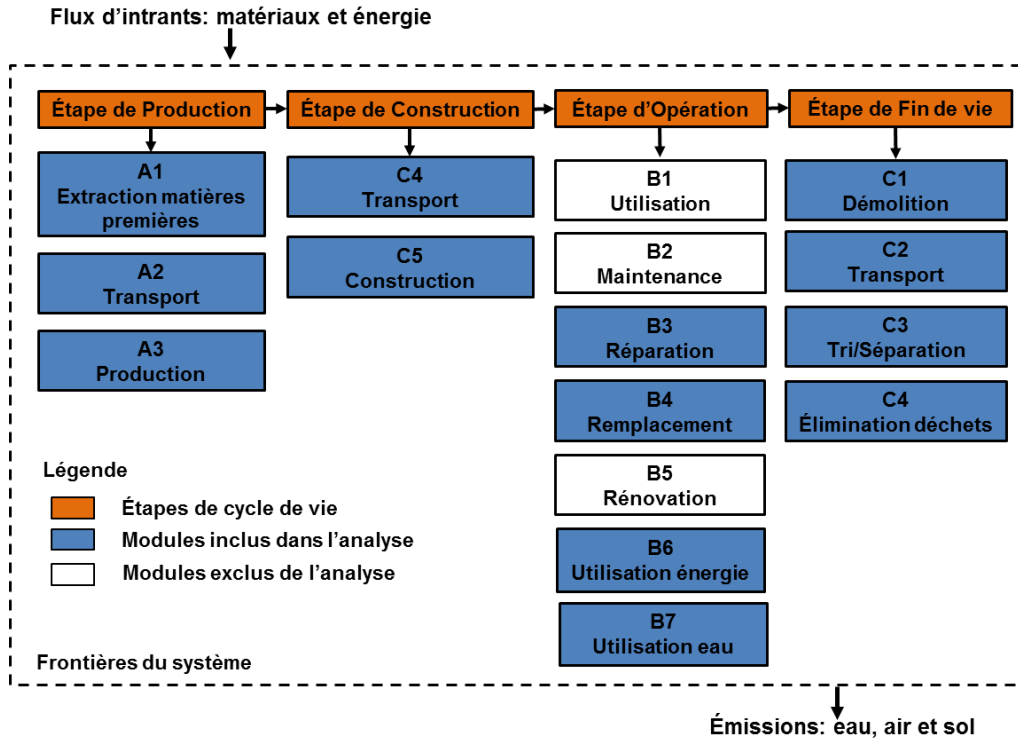


Figure 6. Les frontières du système analysé incluant et excluant les différents modules associés (Inspiré de : EN 15 978 : 2012)

La Figure 6 indique les inclusions et exclusions des frontières du système, du point de vue des modules des étapes du cycle de vie. En ce qui concerne les inclusions, les composantes analysées sont présentées dans le Tableau 4 ci-dessous. Elles se situent principalement au niveau de l'enveloppe et de la structure, mais considèrent aussi les cloisons et les escaliers.

Tableau 4. Composantes des bâtiments incluses dans l'analyse

Position	Composantes (bâtiment bois-bâtiment béton)
Extérieur	Toiture
	Murs
	Soffites
	Parapets
	Fenêtres
	Portes
Intérieur	Dalles
	Colonnes
	Poutres
	Cloisons
	Escaliers
	Portes

Les exclusions de l'analyse découlent de différentes raisons. En effet, en raison de la récente introduction du *CLT* dans la construction de bâtiments de moyenne et grande hauteur (il y a moins de 10 ans) et de la longue durée de vie des matériaux, les données des modules B1, B2 et B5 qui réfèrent aux bâtiments en bois d'ingénierie sont absentes dans la littérature et auprès des professionnels. De plus, en raison de l'égalité au niveau des flux entrants et sortants des processus analysés, certaines composantes similaires ont été exclues de l'étude. Ceci implique toutes les composantes du bâtiment situées en dessous du RDC (Tableau 5). Le processus de vente des appartements avant la construction (c.-à-d. vente sur plans) augmente la variabilité des fournitures entre les différents appartements. Cette variabilité constitue la raison de l'exclusion des finitions intérieures (peinture, vernis et autres) et des fournitures de l'étude, car elles sont fortement influencées par le goût et les moyens financiers des occupants. Dans cette étude, les infrastructures et biens en capital nécessaires à la production des intrants au système ne sont pas analysés.

Tableau 5. Composantes des bâtiments exclues de l'analyse (bâtiment bois-bâtiment béton)

Éléments
Murs des fondations
Dalles des fondations
Murs des niveaux SS1 et SS2
Dalles des niveaux SS1 et SS2
Colonnes et poutres des niveaux SS1 et SS2
Fournitures (ameublement, quincailleries, sanitaires)
Finitions intérieures (peinture, planchers et moulures)

Le ciment est un important ingrédient dans la fabrication du béton, car il sert de liant. Cependant, la production du ciment émet une importante quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Toutefois, le béton absorbe du CO<sub>2</sub> atmosphérique au cours de sa durée de vie et principalement en fin de vie. Ce mécanisme d'absorption du CO<sub>2</sub> par le béton s'appelle carbonatation. En effet, la carbonatation est une réaction chimique entre le CO<sub>2</sub> atmosphérique et l'oxyde ou l'hydroxyde de carbone contenu dans les produits contenant du ciment comme le béton, pour former le carbonate de calcium. Cette capacité d'absorption est fonction de la surface exposée, du milieu d'exposition, de la texture et de la résistance mécanique du béton (Lagerblad, 2005). L'estimation de la masse de CO<sub>2</sub> absorbée ( $m_{CO_2 \text{ ab.}}$ ) par une structure en béton se fait au moyen de l'équation 1 ci-dessous (Collins 2010).

$$m_{CO_2 \text{ ab.}} = P(t) \times C \times CaO \times r \times A \times M \quad \text{Équation (1)}$$

« P » est la profondeur de carbonatation « C » est la quantité de ciment par m<sup>3</sup> de béton, « CaO » est la quantité de CaO dans le ciment (% massique), « M » est le poids moléculaire de l'oxyde, « r » est la portion du CaO qui est complètement carbonaté, « A » est la surface exposée et « M », la fraction molaire du rapport CO<sub>2</sub>/CaO.

Ceci étant dit, l'estimation de la masse de CO<sub>2</sub> absorbée est extrêmement difficile. En effet, l'estimation de la surface des fragments de béton exposés à l'air (paramètre « A ») après démolition du bâtiment est liée à une grande incertitude. Raison pour laquelle, la carbonatation a été exclue de l'analyse de cycle de vie des bâtiments étudiés.

## 4.6 Critères de « cut-off »

Le processus de « cut-off » permet de limiter la quantité de données à collecter et leur modélisation. Il a une influence sur les limites du système étudié et sur les impacts générés. Exprimés en pourcentage (%), les critères de « cut-off » peuvent être calculés sur base massique, énergétique et/ou sur la contribution au niveau de l'impact environnemental (ISO, 14044-2006). La considération erronée d'un critère de « cut-off » présente des risques importants, par exemple sur l'expansion des limites du système (Lenzen, 2000). Plusieurs études indiquent une considération cumulative des trois critères indiqués ci-dessus, à un pourcentage de 5 %. Athena (2013), dans son analyse du cycle de vie du CLT produit au Canada, attribue une limite de 1 % au critère de masse et d'énergie, et de 2 % à la contribution au niveau de l'impact environnemental. Durlinger et al. (2013) dans leur analyse d'un bâtiment en CLT en Australie, considèrent les critères de « cut-off » à 1 % massique et 1 % énergétique. Il est extrêmement difficile de fixer un critère limite de manière générale en ACV, car ceci est strictement dépendant du système étudié. Dans cette étude, les considérations des critères de « cut-off » sont faites sur une base massique et énergétique. Dans le but de réduire les risques mentionnés ci-dessus, l'analyse se limitera à un pourcentage limite de 1 %.

Dans les limites du système étudié, l'égalité entre les processus, les modules ou les étapes du cycle de vie est un critère d'exclusion. En effet, les processus, modules ou étapes du cycle de vie, lorsque considérés identiques sont exclus du système analysé, car ils se caractérisent par des flux intrants et extrants égaux. Dans cette étude, les modules d'analyse et composantes du bâtiment exclus de l'étude sont discutés dans la section 4.4.

## 4.7 Qualité et type de données

Dans la réalisation d'une analyse de cycle de vie, les données utilisées doivent respecter un nombre de critères afin d'assurer la qualité de l'analyse et la précision des résultats. Selon la norme ISO 14044 (2006), les données d'inventaire doivent refléter le plus possible le présent et la situation géographique, les technologies doivent être contemporaines, complètes et précises, et les sources doivent être mentionnées. L'ensemble des données des processus élémentaires inventoriés quantifie les intrants et extrants de l'unité fonctionnelle. L'analyse de la qualité des données est détaillée à la section 6.

En ACV, les données analysées sont de deux types : les données primaires et les données secondaires. Les données primaires sont celles qui n'existent pas au moment de l'initiation de l'étude. Elles nécessitent une recherche et une enquête/sondage auprès des professionnels pour arriver à des données fiables. La vérification de la qualité des données collectées par enquête et entrevues peut être faite par comparaison avec les données de la littérature.

Les données secondaires se caractérisent par leur existence au moment de l'initiation de l'étude. Issues de sources accessibles au public ces données, sous forme de bases de données, sont développées par différents organismes experts reconnus au niveau international.

## 4.8 Procédures d'allocation

Selon la norme ISO 14044 (2006), il est préférable d'éviter les allocations au cours de l'étape d'inventaire. Les allocations passent par une décomposition des processus élémentaires en sous-processus, dans le but d'aller chercher à un niveau plus détaillé les intrants et extrants, ou en agrandissant les frontières du système incluant les fonctions supplémentaires des coproduits.

Lorsque l'allocation est inévitable, il existe différentes procédures d'allocation, dépendamment du procédé et des produits qui en découlent. La première option consiste en une répartition des intrants et extrants du système entre les différents produits ou fonctions, sur la base des relations physiques existantes entre eux (ex. : relation massique, etc.). En cas d'absence de relation physique, d'autres relations mutuelles entre les produits et les fonctions peuvent être établies ou utilisées comme base de la procédure d'allocation, comme par exemple, l'allocation proportionnelle à leur valeur économique. Il est indispensable, lors de la procédure d'allocation, de s'assurer que la somme des intrants et extrants des différents produits soit égale aux intrants et extrants du processus élémentaire. Les procédures d'allocation appliquées aux principaux matériaux de construction (bois, acier, aluminium et béton) pour les étapes de production et de fin de vie du cycle de vie sont discutées ci-dessous.

Pour la production du *CLT*, les allocations massiques et économiques peuvent être appliquées. Les allocations massiques réduisent les impacts du *CLT*, tandis que les allocations économiques les augmentent, en raison du prix élevé du *CLT* en comparaison à celui des coproduits (sciure ou copeaux) (O'Connor et al. 2013). Sur la base de cette valeur économique négligeable des coproduits par rapport à celle du produit *CLT*, ce dernier est considéré comme un produit unique issu du processus de transformation. A cet effet, aucune allocation ne sera attribuée à l'étape de production du *CLT* (Athena, 2013a). Il est important de réitérer que les données de cette étape du cycle de vie du *CLT* seront des données secondaires. Elles proviendront des travaux passés de l'institut Athéna sur la production du *CLT* et du bois lamellé-collé au Québec. Pour l'étape de fin de vie, les scénarios analysés sont l'enfouissement et l'incinération. La quantité de déchets de bois destiné à l'incinération est estimée à 1 % de la masse totale du bois et des dérivés utilisés dans chaque bâtiment (Recyc-Québec, 2015).

Pour l'acier, il existe deux types d'approches. L'approche contenu recyclé (*recycled content approach*) et l'approche recyclage en boucle fermée (*closed loop approach*) en fin de vie. L'approche contenu recyclé (*recycled content approach* ou *cut-off approach*) se focalise sur le produit et considère uniquement la matière recyclée à l'entrée d'un procédé de production d'un produit. Elle n'affecte pas le fardeau environnemental de l'acier vierge à la matière recyclée utilisée (Worldsteel association 2011). Cette approche est intéressante car elle permet de mettre l'accent sur l'augmentation de matière recyclée dans la fabrication de nouveaux produits. L'approche recyclage en boucle fermée quant à elle est une approche globale du recyclage qui met un accent sur le recyclage en fin de vie. Contrairement à la méthode contenu recyclé, cette méthode affecte le fardeau environnemental de l'acier vierge à l'acier recyclé en fin de vie. En effet, elle considère que l'impact environnemental d'un produit dépend strictement de la quantité ou du taux de recyclage effectué en fin de vie (approche de l'industrie de l'acier).

Dans un contexte visant la réduction des gaz à effet de serre à court terme, l'approche contenu recyclé est celle considérée lors du choix des procédés (proxies) de production des matériaux en acier dans la modélisation, car elle évite de renvoyer dans un futur lointain (aux générations futures) les impacts environnementaux liés au cycle de vie de l'acier (Athena, 2013b Grann, 2013). Dans le cas de l'acier recyclé, selon une étude menée par l'institut Athéna sur la production d'acier au Canada et aux Etats-Unis, l'énergie intrinsèque de l'acier recyclé est négligeable comparée à celle de la production d'acier vierge (Athena, 2002b). Les proxies utilisées pour modéliser l'étape de production des matériaux en acier proviennent de la base de données « Ecoinvent 3 Allocation, Default Content – Unit ».

Dans le cas de l'aluminium, le pourcentage d'utilisation d'aluminium recyclé dans le procédé de production de nouveaux produits est élevé. Il peut atteindre jusqu'à 70 %, dont 40 % est issu de résidus de production post-industrielle et 60 % de l'extérieur (post-consommation). Pour ce matériau, l'approche « contenu recyclé » est utilisée.

Pour la composante béton, l'allocation dans l'étape de production et de fin de vie est sur base massique (Athena, 2016). Dans la fin de vie, l'allocation de 97,1 % de la masse totale du béton est attribuée au processus de recyclage et 2,9 % de la masse est attribuée au processus d'enfouissement (Recyc-Québec 2015). Comme dans le cas des autres matériaux, le processus de recyclage en fin de vie est exclu des scénarios de gestion des déchets car en dehors des frontières du système étudié.

#### **4.9 Méthode d'analyse des impacts**

L'attribution des impacts environnementaux à une substance ou un matériau inventorié passe par l'application d'une méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV). Le choix de la méthode d'analyse des impacts utilisée lors de l'ACV a une influence importante sur les résultats, car les facteurs de caractérisation génériques (au niveau d'un continent) ou spécifiques (locaux) utilisés dans le développement des méthodes tiennent compte de la localisation géographique. Ces facteurs de caractérisation transforment une quantité de substance émise en une quantité équivalente de substance de référence propre à la catégorie d'impact considérée (Jolliet et al. 2010). Communément utilisée dans les DEPs/PCR nord-américains, la méthode TRACI a été développée par l'agence de protection environnementale américaine (EPA) et ensuite a été implémentée dans l'analyse des impacts environnementaux (AIE) (Grann, 2013; Ivan, 2013). C'est une méthode simple et facile d'utilisation, qui inclut les facteurs de caractérisation spécifiques et appropriés au contexte nord-américain (Bare, 2011). Dans ce fil d'idée, la méthode d'analyse d'impact TRACI 2.1 v 1.04 a été sélectionnée comme outil d'évaluation des impacts sur l'environnement dans cette étude.

Les catégories d'impacts et leurs indicateurs pris en compte dans cette étude sont présentés dans le Tableau 6 et décrits dans les paragraphes ci-dessous. Les catégories d'impacts sont fournies par le calculateur SimaPro. Dans le cadre d'une analyse, plusieurs méthodes sont utilisées afin de mieux interpréter les résultats (ISO, 2006). À ce titre, la méthode IMPACT 2002+ v 2.14, a été utilisée comme méthode de comparaison des résultats obtenus à partir de la méthode TRACI. En raison du fait que la méthode TRACI permet de caractériser les catégories d'impacts intermédiaires (midpoints), celles considérées avec la méthode Impacts 2002+ correspondent aussi aux catégories intermédiaires. Ceci a permis de comparer les résultats des catégories intermédiaires entre elles. Comme mentionné dans la norme ISO 14044, les résultats d'une analyse de cycle de vie sont des expressions relatives et ne peuvent en aucun cas être utilisés à des fins de prédiction.

Bien que la méthode TRACI présente un grand nombre d'indicateurs, le nombre d'indicateurs analysé dans cette étude est limité. Ceci en raison des objectifs de l'étude et du plan d'action gouvernemental dans lequel s'inscrit le présent projet de recherche. Axés sur les matériaux de construction et sur les émissions de GES, les indicateurs considérés sont ceux recommandés par la règle de catégorie de produit (Product Category Rules (PCR) en anglais) développé par FPInnovations pour l'industrie forestière (FPInnovations, 2018). Du fait que le plan d'action du gouvernement repose sur les changements climatiques, un regard particulier a été porté à la catégorie d'impact changement climatique.

Tableau 6. Catégories d'impacts et unités respectives

Catégories d'impacts	Unités
Changements climatiques	kg équivalent CO <sub>2</sub>
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg équivalent CFC - 11
Eutrophisation	kg équivalent N
Acidification	kg équivalent SO <sub>2</sub>
Smog photochimique	kg équivalent O <sub>3</sub>

#### 4.9.1 Changements climatiques

La catégorie « *potentiel de réchauffement global* » (PRG) ou « *Global Warming Potential* » (GWP) réfère à la contribution des émissions issues d'activités humaines sur le forçage radiatif dans l'atmosphère (effet de serre). L'augmentation du forçage radiatif se solde par une augmentation ou une baisse de la température à la surface de la Terre. Cette variation de température peut avoir des impacts sur les écosystèmes, la santé humaine et les biens matériels (Guinée et al. 2002). Le modèle développé par le *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en anglais)*, dont le facteur de caractérisation nommé *Global Warming Potential (GWP)*, est celui utilisé par la plupart des méthodes d'évaluation des impacts. Il exprime la capacité d'un gaz à absorber les radiations infrarouges et donc à contribuer aux changements climatiques. Le potentiel de réchauffement global (PRG) d'une substance correspond au ratio entre l'augmentation de l'absorption des radiations infrarouges qu'elle cause par rapport à 1 kg de CO<sub>2</sub> (Hauschild et al. 2009b). La considération du carbone biogénique est fonction de la méthode d'analyse d'impacts considérée. Dans cette étude, la méthode d'analyse des impacts qui a été utilisée est la méthode nord-américaine TRACI. La méthode TRACI attribue la valeur zéro (0) au facteur d'absorption et d'émission du carbone biogénique.

#### 4.9.2 Appauvrissement de la couche d'ozone

Le « *potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone* » (ou *Ozone Depletion Potential (ODP) en anglais*) traite de l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique. Elle résulte des effets des émissions issues des activités humaines sur la couche d'ozone. Cet appauvrissement permet à plus de rayons ultra-violet de type B d'atteindre la surface de la Terre, avec des impacts négatifs sur la santé des êtres vivants, les écosystèmes, les cycles biochimiques et les biens matériels (Guinée et al. 2002). Cette catégorie fait consensus au niveau de la communauté scientifique internationale. La plupart des méthodes utilisent le modèle de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), qui modélise le changement d'épaisseur de la couche d'ozone causé par l'émission d'une substance par rapport au CFC-11 (trichlorofluorométhane) qui est la substance de référence (Baumann and Tillman, 2004).

#### 4.9.3 Eutrophisation

L'eutrophisation est causée par la présence excessive de nutriments phosphorés (P) et azotés (N) dans l'environnement. L'émission de matières organiques contribue à l'eutrophisation des milieux aquatiques. La présence excessive de nutriments dans les milieux aquatiques et terrestres peut modifier la composition des espèces d'un écosystème et augmenter la production de biomasse (Norris, 2003). L'eutrophisation est une



catégorie importante d'évaluation de la qualité de nos écosystèmes. La mesure de référence est le kg équivalent azote.

#### 4.9.4 Acidification

Le « *potentiel d'acidification* » (ou *Acidification Potential* (AP) en anglais) d'une substance est mesuré par sa capacité à former des ions  $H^+$ . Les principales substances acidifiantes sont  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$  et HCl. Les vecteurs des polluants acides de l'atmosphère vers la surface de la Terre sont la pluie, le brouillard, la neige et la rosée. Le potentiel d'acidification est le facteur de caractérisation. Il se définit comme le nombre d'ions  $H^+$  produit par kilogramme d'une substance donnée, par rapport à 1 kg de  $SO_2$ . L'acidification varie en fonction du milieu et de la substance acidifiante. Le potentiel d'acidification représente donc l'acidification maximale qu'une substance peut causer. Comme l'eutrophisation, l'acidification est un excellent indicateur de la qualité de nos écosystèmes.

#### 4.9.5 Smog photochimique

Le smog photochimique est reconnu comme étant nocif pour la santé humaine et les écosystèmes. Les produits chimiques réactifs (photo-oxydants) tels que l'ozone ( $O_3$ ), le peroxyde d'hydrogène et divers aldéhydes sont responsables de sa formation au niveau de la troposphère (Norris, 2003). La mesure de référence est le kg équivalent  $O_3$ .

#### 4.9.6 Interprétation des résultats

Cette phase de l'analyse permet d'identifier les points sensibles du cycle de vie et de proposer des améliorations. La phase d'interprétation du cycle de vie inclut aussi une évaluation de la qualité et de la robustesse des résultats (Jolliet et al. 2010). Cette évaluation se fera par le biais du contrôle de qualité des résultats et d'une analyse de sensibilité. Pour le contrôle de la qualité, les résultats générés par la méthode TRACI seront comparés à ceux générés par la méthode IMPACT 2002+, tandis que l'analyse de sensibilité portera sur les points chauds et sur deux matériaux de l'enveloppe du bâtiment : l'isolant à base de laine de roche et les revêtements extérieurs. Les impacts d'une durée de vie plus longue seront aussi analysés.

#### 4.9.7 Processus de revue critique

Pour s'assurer de la conformité de l'étude aux normes ISO 14 040/44 (2006), le rapport a suivi un processus de revue critique par un expert indépendant. Le réviseur indépendant externe mandaté est M. François Charron-Doucet, Ing. M.Sc. A, Directeur scientifique – Responsabilité d'entreprise du Groupe AGÉCO. Le groupe AGÉCO est un groupe expert en évaluation environnementale des produits et des biens.

## 5. INVENTAIRES DU CYCLE DE VIE (ICV)

Cette section du rapport illustre en détail les informations et les considérations retenues dans la réalisation de l'inventaire, les intrants et extrants des frontières du système du point de vue matière et énergie. L'inventaire est présenté pour chaque module des différentes étapes du cycle de vie des bâtiments, selon la norme EN 15 804.

## 5.1 Inventaire des matériaux

Le bilan des matériaux permet d'avoir un aperçu global des matériaux impliqués dans la construction des deux bâtiments analysés. Il inclut les matériaux du plancher du RDC à la toiture du 8<sup>e</sup> étage. Les matériaux inventoriés composent la structure (colonnes, poutres, planchers et toiture), les balcons, l'enveloppe, les cloisons et escaliers extraits du logiciel Building Information Modeling (*BIM*). Le bilan liste les matériaux et leurs quantités (kg) respectives. Les quantités calculées par le *BIM* sont majorées d'un pourcentage pour tenir compte des déchets générés lors de la construction, car les données *BIM* ne correspondent qu'à celles du design (section 5.3.2). Les pourcentages de déchets sont attribués en fonction du matériau et varient entre 0 % et 15 % (Athena, 2017). Les produits en acier et en aluminium ont subi des manipulations. L'estimation de la quantité de matière (m<sup>3</sup> ou kg) dans les produits profilés en acier ou en aluminium (ex. : colombage en acier léger, portes et fenêtres) a été calculée sur la base des fiches techniques des produits et des surfaces fournies par *BIM*, car le logiciel *BIM* considère les volumes de ces produits comme des volumes pleins et non comme des profilés. Cette considération surestime les quantités d'acier et aluminium des produits utilisées dans la construction des bâtiments analysés.

Les quantités de matériaux varient entre les deux bâtiments pour les raisons suivantes :

- ✓ Selon le code du bâtiment en vigueur, dans un bâtiment de grande hauteur en bois, un faible pourcentage des éléments structuraux en bois ne reste visible, pour des raisons de performance au feu. Ceci implique une utilisation importante du gypse.
- ✓ Pour des raisons de performance acoustique, des chapes de béton d'un demi-pouce d'épaisseur, des panneaux isolants « Sonopan », du polythène, de la laine de verre et une double couche de panneaux de gypse sont ajoutés au plancher de *CLT*.
- ✓ À l'heure actuelle, la conception des planchers en *CLT* ne permet pas le passage de la tuyauterie dans la masse du *CLT*. La tuyauterie est donc localisée dans les plafonds, ce qui réduit la hauteur des plafonds de près de 6 pouces. Ceci implique une réduction de 6 pouces de hauteur sur chaque étage, pour tous les étages. Cette réduction touche tous les matériaux impliqués dans les murs (intérieurs, extérieurs et refend).
- ✓ Les isolants en pente utilisés dans le bâtiment en bois au niveau de la toiture sont éliminés en totalité dans le cas du bâtiment en béton, car la toiture est coulée en pente.

Dans le calcul de la hauteur réduite de 6 pouces, différentes hauteurs ont été déterminées (Tableau 7).

Tableau 7. Pourcentages de réduction des différentes hauteurs

Étages	Hauteurs moyennes inter-axe (mm)	Hauteurs moyennes entre dalles (mm)
Du 2 <sup>e</sup> au 8 <sup>e</sup>	2 952 (5 %) <sup>1</sup>	2 777 (5 %)
RDC	3 870 (4 %)	3 667.5 (4 %)

1 Les chiffres entre parenthèses indiquent la valeur de 6 pouces exprimée en %, en fonction de la hauteur considérée.

Le bilan des matériaux de construction est présenté dans le Tableau 8. Dans un exercice de validation des données *BIM*, les quantités de bois de la structure du bâtiment Arbora C (colonnes, poutres et panneaux *CLT*), produites par *BIM* ont été validées par le fabricant Nordic Structure.

Tableau 8. Inventaire des matériaux de construction

Nom des matériaux	Quantité (kg)		
	Bâtiment bois	Bâtiment béton	Différence entre bois et béton
Gravier de 19 mm	74 575	74 575	0
Poussière de pierre	22 430	22 430	0
Panneau drainant – 15 mm	10 823	10 823	0
Béton coulé	3 782 022	10 924 002	-7 141 980
Panneau Soprasmart <sup>MD</sup>	1 506	1 506	0
Brique blanche – 90 mm	223 381	211 855	11 526
Brique grise – 90 mm	177 958	168 776	9 183
Brique noire – 90 mm	22 473	21 313	1 160
Brique noire – 90 mm – damier	28 120	26 669	1 451
Aluminium anodisé – charbon/gris	6 444	6 444	0
Bâti en acier	9 968	9 437	532
Fourrure résiliente – 13 mm	2 620	655	1 965
Persienne – aluminium anodisé – charbon	63 404	60 133	3 272
Bois – CLT	973 261	0	973 261
Bois – poutres	182 660	0	182 660
Panneau de contreplaqué – 16 mm	7 685	7 685	0
Acier pré-peint noir	197	187	10
Isolant d'uréthane giclé – 50 mm	17	17	0
Isolant d'uréthane giclé – 90 mm	5 671	5 671	0
Isolant de laine de fibre de verre – 92 mm	1 120	1 120	0
Isolant de laine de fibre de verre – 152 mm	1 346	1 346	0
Isolant en pente – 13 mm @ 141 mm	3 896	0	3 896
Isolant polyisocyanurate	4 242	4 242	0
Isolant rigide de type 4	659	0	659
Isolant rigide en panneau de fibres de type 2	11	11	0
Isolant rigide type 4 – 50 mm	24	24	0
Isolant rigide type 4 – 100 mm	24	24	0
Isolant semi-rigide	11 630	11 630	0
Membrane acoustique (liège 5 mm)	201 495	0	201 495
Membrane autocollante	1 209	1 209	0
Membrane de toiture remontée	53	53	0
Panneau d'aluminium pré-peint – 32 mm	2 487	2 487	0
Panneau Prodema – 8 mm	3 336	3 164	172
Pare-air/pare-vapeur en feuilles soudées à chaud	21	21	0
Solin en acier pré-peint	78	78	0
Toile de filtration tissée de polyoléfines	609	609	0
Cadre en acier	15 096	15 096	0
Fourrure d'acier galvanisé – 22 mm	1 254	1 254	0
Fourrure oméga en aluminium – 19 mm	740	740	0

Nom des matériaux	Quantité (kg)		
	Bâtiment bois	Bâtiment béton	Différence entre bois et béton
Montant en acier galvanisé – 64 mm type "CH"	41 515	10 379	31 136
Montant en acier galvanisé – 64 mm	912	862	50
Montant en acier galvanisé – 92 mm	14 342	13 555	787
Montants en acier galvanisé – 152 mm	619	585	34
Panneau de gypse régulier – 12.7 mm	149 342	147 482	1 860
Panneau de gypse type C – 12.7 mm	266 092	241 590	24 502
Panneau de gypse type X – 15.9 mm	26 417	26 448	-31
Panneau de gypse type X – 25.4 mm	275	69	206
Panneau support en mats fibre verre – 12.7 mm	24 259	23 007	1 252
Verre générique	10 727	10 727	0
Verre opacifié	1 166	1 166	0
Acier – balcon	55 507	0	55 507
Carton fibre	3 516	0	3 516
Panneau de porte	9 114	9 114	0
Finitions intérieures - Placoplatre	443 892	443 892	0
Grfv - gypse renforcé de fibres de verre	1 533	1 449	84
Métal - faible épaisseur	369	349	20
Métal - montants	717 569	678 175	39 395
Métal - montants CH	2 106	1 991	116
Porte - cadre	1 502	1 502	0
Porte - panneau	3 959	3 959	0
Colonne	82 893	464 173	-381 279
Verre	4	4	0
Armature	51 775	437 575	-385 800
Acier inoxydable	0	2 507	-2 507
Neopor <sup>MD</sup>	0	687	-687
Structure acier brique	51 793	30 589	21 205
<b>Total</b>	<b>7 805 745</b>	<b>13 909 371</b>	<b>-6 103 626</b>

## 5.2 L'étape de production

Dans le cycle de vie d'un produit, l'étape de production est la première. Elle est constituée de trois modules : extraction des ressources (A1), transport vers l'usine de fabrication (A2) et fabrication du produit (A3). Ces trois modules de l'étape de production du cycle de vie ont été analysés.

### 5.2.1 Extraction, Transport et Production (A1, A2 et A3)

Les différents processus de production sélectionnés, incluant l'extraction et le transport, sont modélisés à partir des *proxies* unitaires de la base de données Ecoinvent v 3.0.

Pour les matériaux comme l'aluminium et l'acier, les *proxies* unitaires utilisées incluent la matière recyclée dans le processus de production. Les battants des portes en acier sont composés d'un châssis intérieur fait de

deux (2) montants et trois (3) traverses, et de deux plaques de recouvrement. Les cavités sont remplies d'isolant acoustique de type EPS. Le matériau composite du panneau « Prodema » est décomposé en placage et âme en résine phénolique.

La modélisation des produits composés comme le panneau Prodema, tiendra compte de la production de chaque composante, en négligeant les impacts de production des assemblages. N'existant pas dans la base de données utilisée, le processus de production des panneaux *CLT* a été créé sur la base du processus de production du bois lamellé-collé. Les données de la production du *CLT* au Canada utilisées à cet effet sont celles produites par l'institut Athena (Athena, 2013). Dans la validation des procédés de production, les composantes « transport et énergie » font référence respectivement au transport routier et au panier énergétique de la province de Québec. Il est important de souligner l'exclusion de l'inventaire, des données d'infrastructures et des équipements de longue durée, tels qu'usines et autres, pour chacune des étapes du cycle de vie.

### **5.3 L'étape de la construction**

L'étape de construction se décompose en deux modules : le transport des produits fabriqués jusqu'au site de construction (A4) et l'érection des bâtiments (A5).

#### **5.3.1 Transport (A4)**

Le module transport décrit dans cette section comprend le transport des matériaux de construction, du manufacturier jusqu'au site de construction. Cette énergie de transport (tkm) est égale au produit de la masse (tonne) de matériaux à transporter multiplié par la distance (km). Le transport intervient aussi dans les modules réparation (B3), remplacement (B4), démolition (C1) et en fin de vie (C2). Le type de transport considéré est celui sur roues. La provenance à 100 % de la province de Québec, des matériaux de construction des bâtiments analysés, nous amène à faire une considération selon laquelle, les entreprises manufacturières les plus proches du site de construction sont celles considérées comme fournisseurs. La Figure 7 illustre les distances d'approvisionnement des principaux matériaux de construction (*CLT*, lamellé-collé, béton, aluminium et isolants).

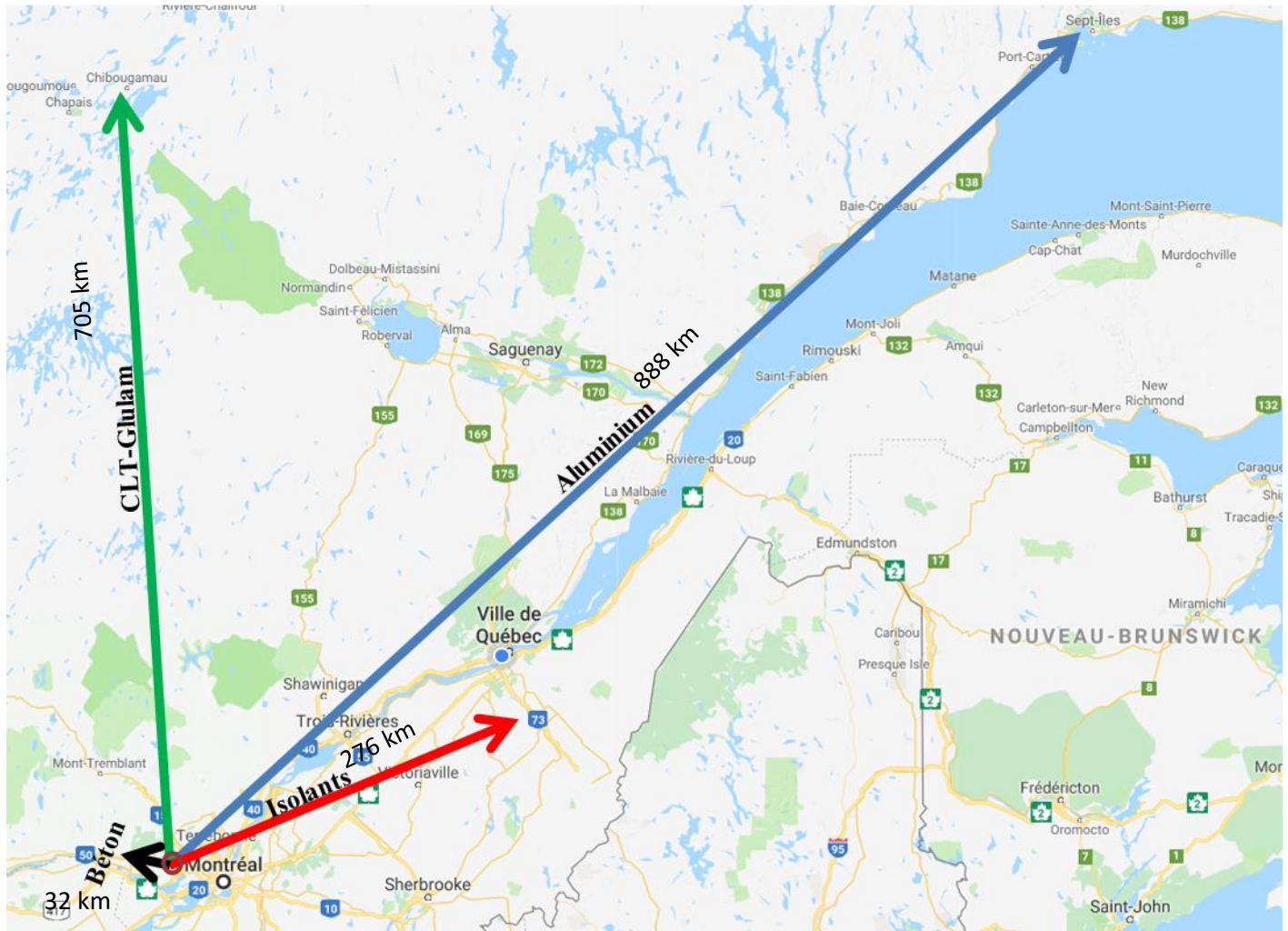


Figure 7. Distance d'approvisionnement des principaux matériaux de construction

La capacité des camions est de 32 tonnes. Dans le trajet aller et retour, seul le trajet aller a été considéré. Ceci en raison de l'utilisation de sous-traitants spécialisés en matière de transport, qui opèrent dans la logique d'optimisation des ressources. Cette stratégie permet de limiter les voyages vides. Les distances parcourues pour livrer les différents matériaux sur le site de construction sont les mêmes pour les deux bâtiments et sont présentées dans la Figure 8. L'énergie totale de transport (tkm) des matériaux de construction pour le bâtiment en bois est estimée à 2 092 ktkm et à 1 949 ktkm pour le bâtiment en béton.

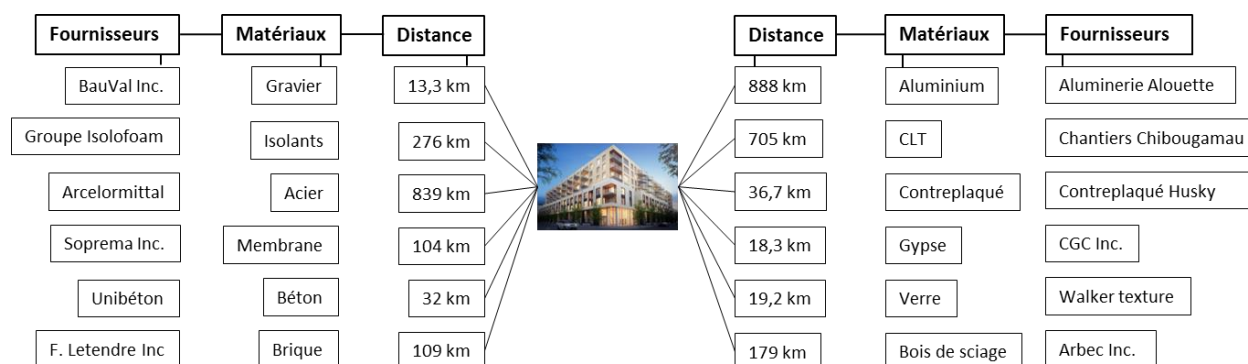


Figure 8. Distance de transport des matériaux de construction des fournisseurs vers le site de construction

Une autre source de consommation énergétique est celle du déplacement des ouvriers vers le chantier. Le rayon de déplacement considéré est de 10 km avec un transport en groupe. Le calcul de la consommation énergétique liée à la mobilité des ouvriers nécessite des hypothèses valides pour la construction des deux bâtiments.

- Présence permanente de 40 personnes sur le chantier avec un déplacement de 2 à 2, génère 20 allers et 20 retours par jour de travail.
- Durée du chantier de 12 mois.

Sur la base de ces considérations, avec une consommation de 20 litres aux 100 km et un facteur de conversion de litre d'essence à énergie (MJ) de 38,68, la consommation énergétique par voyage liée au déplacement de la main-d'œuvre est de 20,5 GJ pour un total de 817 GJ pour le bâtiment en bois. Dans le cas du bâtiment en béton, cette consommation énergétique est estimée à 1 634 GJ. L'estimation double de l'énergie de transport se base sur le fait que les chantiers de construction en béton ont une durée d'exécution plus longue (deux fois) comparativement aux chantiers en bois d'ingénierie (Groupe AGECO 2018). En fait, cet écart est principalement causé par la durée de séchage des éléments structuraux (colonnes, poutres, dalles, murs de refend) et non structuraux en béton coulé sur place.

### 5.3.2 Construction (A5)

La construction du bâtiment implique une consommation d'énergie et une production de déchets. La consommation d'énergie est liée principalement à l'utilisation des équipements tels que grue à tour, nacelles, chariots élévateurs, ventilateurs et chaufferettes, scies, perceuses/visseuses, cloueuses, agrafeuses, etc. L'énergie consommée sur le site de construction est principalement de l'hydroélectricité. La grue utilisée dans le chantier est de 40 tonnes de marque « Peiner SK 415-20 » et de 35.1 kW de puissance. Utilisée pendant 16 semaines à raison de 40 heures par semaine, elle contribue à la consommation d'énergie dans le chantier en

matière d'équipement. La durée d'érection d'une structure en bois est deux fois plus rapide que pour une structure en béton/acier, pour la même raison ci-dessus mentionnée (Groupe AGECO 2018). Sur cette base, la durée d'utilisation de la grue considérée est de 32 semaines pour le bâtiment comparable en béton. Le séchage des dalles de béton est effectué à l'aide de chaufferettes alimentées au propane (gaz). Les données sur la consommation énergétique lors de la construction sont présentées dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9. Consommation énergétique en phase de construction

Éléments	Consommation (GJ)	
	Bâtiment bois	Bâtiment béton
Grue	81	162
Chaufferette	0	12,17

Les opérations de mise en dimensions, de perçage et d'assemblage génèrent des déchets de construction. La quantité de déchets de chaque matériau représente un pourcentage de la quantité totale du matériau analysé. Ce pourcentage varie en fonction du type de matériau. Sur la base d'une étude réalisée par l'institut Athena, les pourcentages de déchets des matériaux utilisés ont été définis. Ils varient entre 0 % pour les éléments préfabriqués (*CLT* et lamellé-collé) et 15 % pour le Placoplatre. Le pourcentage et la quantité respective de déchets assignés aux différents matériaux utilisés sont répertoriés dans le Tableau 10.

Tableau 10. Pourcentage et quantité de déchets générés

Nom des matériaux	Facteur (%)	Déchets (kg)		Différence bois-béton
		Bâtiment Bois	Bâtiment béton	
Panneau drainant – 15mm	2	216	216	0
Béton léger coulé en place	5	158 522	130 218	28 304
Panneau Soprasmart <sup>MD</sup>	1	15	15	0
Dalle de béton – 100mm	5	3 575	3 575	0
Aluminium anodisé – charbon/gris	1	64	64	0
Fourrure résiliente – 13mm	1	26	7	20
Persienne – aluminium anodisé – charbon	1	634	601	33
Béton structural coulé	5	264	386 725	-386 461
Panneau de contreplaqué – 16mm	1	77	77	0
Acier pré-peint noir	1	2	2	0
Isolant de laine de fibre de verre – 92mm	5	56	56	0
Isolant de laine de fibre de verre – 152mm	5	67	67	0
Isolant en pente – 13mm @ 141mm	5	195	0	195
Isolant polyisocyanurate	5	212	212	0
Isolant rigide de type 4	5	33	0	33
Isolant rigide en panneau de fibres type 2	5	1	1	0
Isolant rigide type 4 – 50mm	5	1	1	0
Isolant rigide type 4 – 100mm	5	1	1	0
Isolant semi-rigide (laine de roche)	5	581	581	0
Membrane acoustique (liège 5mm)	3	6 045	0	6 045
Membrane de toiture remontée	3	2	2	0



Nom des matériaux	Facteur (%)	Déchets (kg)		Différence bois-béton
		Bâtiment Bois	Bâtiment béton	
Panneau d'aluminium pré-peint – 32mm	1	25	25	0
Pare-air/pare-vapeur en feuilles soudées à chaud	5	1	1	0
Solin en acier pré-peint	1	1	1	0
Toile de filtration tissée de polyoléfines	2	12	12	0
Cadre en acier	1	151	151	0
Fourrure d'acier galvanisé – 22mm	1	13	13	0
Fourrure oméga en aluminium – 19mm	1	7	7	0
Montants en acier galvanisé – 64mm type "CH"	1	415	104	311
Montants en acier galvanisé – 64mm	1	9	9	1
Montants en acier galvanisé – 92mm	1	143	136	8
Montants en acier galvanisé – 152mm	1	6	6	0
Panneau de béton léger – 13mm	5	367	348	19
Panneau de béton préfabriqué – 38mm	5	4 201	4 201	0
Panneau de gypse régulier – 12.7mm	1	1 493	1 475	19
Panneau de gypse type C – 12.7mm	1	2 661	39	2 622
Panneau de gypse type X – 15.9mm	1	264	264	0
Panneau de gypse type X – 25.4mm	1	3	1	2
Panneau OSB – 12.7mm	1	243	230	13
Acier (attaches, plaques d'assemblage, etc.)	1	555	0	555
Béton – bloc de béton	5	19 179	18 189	990
Carton fibre	5	176	0	176
Béton – coulé en place	5	771	731	40
Finitions intérieures – Placoplatre	15	66 584	66 584	0
GRFV – Gypse renforcé de fibres de verre	1	15	14	1
Métal – faible épaisseur	1	4	3	0
Métal – montants	1	7 176	6 782	394
Métal – montants "CH"	1	21	20	1
Armature	1	518	4 376	-3 858
Béton – pont thermique	5	0	21	-21
Structure acier brique	1	518	306	212
Total		276 122	626 471	-350 349

La quantité de déchets générés lors de la construction varie d'un bâtiment à l'autre, car elle est liée à la masse des matériaux utilisés. Les déchets générés sont de 276 tonnes pour le bâtiment en bois et 627 tonnes pour le bâtiment en béton. Ces déchets sont transportés vers un centre de tri où ils seront traités. Le centre de tri considéré se situe à 11,3 km du site de construction. L'énergie de transport des déchets est de 3 119 tkm et de 7 085 tkm respectivement, pour le bâtiment en bois et le bâtiment en béton. L'énergie de tri (module C3) et la gestion des déchets (module C4) sont traitées dans la section 5.5.

## 5.4 Opération du bâtiment

L'étape d'opération se décompose en sept modules. Cependant, les seuls modules inclus dans cette analyse sont la réparation, le remplacement, l'énergie d'opération et l'eau consommée.

### 5.4.1 Réparation (B3)

En général, les opérations de réparation sont identiques et limitées dans les deux bâtiments. Elles se situent exclusivement au niveau de l'enveloppe (joints entre matériaux). Les produits utilisés sont : du silicone, du mortier et de la mousse polyuréthane. Les données d'estimation des quantités de produits utilisées sur la durée de vie des bâtiments sont des données secondaires. Les facteurs (kg/m<sup>2</sup>) d'estimation de la quantité (kg) de matériaux nécessaires pour la réparation proviennent d'une étude faite par l'institut Athena (Athena, 2002). Ces facteurs sont multipliés par la surface recouverte par le matériau à réparer. Les facteurs de production de déchets sont estimés à 10 % de la masse totale du produit utilisé. Le Tableau 11 donne des informations sur les produits de réparation et les quantités estimées, incluant le pourcentage de déchets. Dans la littérature, les données sur la consommation énergétique (kWh) pour ce module sont négligeables (Athena, 2002). La consommation énergétique en matière de réparation et de transport des matériaux jusqu'au site de réparation n'est pas prise en compte dans cette étude, parce qu'elle est estimée négligeable.

Tableau 11. Liste des matériaux nécessaires à la réparation

Matériaux	Quantité	Unité
Silicone	3 662	kg
Mortier	118	kg
Polyuréthane	3	kg

### 5.4.2 Remplacement (B4)

La connaissance de la durée de vie réelle (DVR) en service des matériaux de construction permet d'estimer le temps ou la période dans laquelle un matériau peut ou doit être remplacé. Le remplacement est lié à une perte de performance ou à un dommage majeur. Le remplacement peut être partiel ou total, dépendant du type de matériau. Le ratio de remplacement est une donnée absente dans la littérature scientifique et extrêmement difficile à déterminer, car elle varie en fonction du type de bâtiment, de l'usage, du niveau de service offert, etc. Considérant par exemple les panneaux de gypses, le ratio de remplacement est fortement influencé par le comportement de l'occupant. En raison de l'exclusion de l'étude des fournitures et éléments de finition intérieure/extérieure comme peinture, revêtement plancher, etc., les matériaux à remplacer sont limités.

En utilisant la DVR de chaque matériau, les facteurs de remplacement ont été calculés sur une base de 60 ans et multipliés par la quantité totale de chaque matériau, suivant l'équation (2). Le Tableau 12, présente la liste des matériaux à remplacer au cours de la durée de vie de 60 ans et est la même pour les deux bâtiments étudiés.

$$Mr = MT \times \frac{DVB-DVM}{DVM} \quad \text{Équation (2)}$$

où :

$Mr$  est la masse à remplacer,

$MT$  est la masse totale du matériau considéré,

$DVB$  est la durée de vie du bâtiment,

$DVM$  est la durée de vie du matériau et

le rapport  $\left[\frac{DVB-DVM}{DVM}\right]$  constitue le facteur de remplacement.

L'énergie de remplacement des matériaux est la même dans les deux bâtiments. En considérant deux nacelles articulées et autres équipements à alimentation électrique, une moyenne de 0,124 MJ par kg de matériaux remplacés a été calculée. Avec une masse de 393 tonnes de matériaux à remplacer, le besoin en énergie s'estime à 49 GJ. Ceci est identique pour chacun des bâtiments.

L'énergie de transport liée à l'approvisionnement du chantier en matériaux et produits de remplacement est calculée à 62 683 tkm. Les matériaux remplacés sont transportés vers un centre de tri situé à 11,3 km du site. Cette énergie de transport est calculée à 4 441 tkm. L'énergie (kWh) nécessaire au tri des matériaux remplacés (393 tonnes) est traitée dans la section 5.5.

Tableau 12. Quantité de matériaux à remplacer pendant 60 ans de durée de vie pour les deux bâtiments

Noms des matériaux	DVR (ans)	Facteur	Quantité remplacée (kg)	Approvisionnement Transport (tkm)
Membrane de finition toiture	22	2	2 419	252
Membrane de toiture	22	2	2 419	252
Membrane de toiture remontée	30	1	52,84	6
Panneau de contreplaqué extérieur – 15.9 mm	30	1	7 685	282
Panneau de revêtement FC2	40	1	91 358	2 923
Panneau de sous-couche haute performance	25	1	1 506	416
Sous-couche ME06	25	1	201 495	20 955
Portes et cadres en acier	20	2	30 191	25 331
Portes et fenêtres en aluminium	20	2	12 887	11 444
Double vitre	20	2	42 906	824
Total			392 919	62 683

### 5.4.3 Besoin en énergie (B6)

Dans la phase d'opération des bâtiments, la demande en énergie est importante. Utilisée pour le chauffage, l'éclairage, l'eau chaude, la climatisation, le fonctionnement des électroménagers et autres appareillages domestiques, l'énergie consommée diffère du secteur résidentiel au secteur commercial. L'énergie consommée dans cette étape du cycle de vie du bâtiment est entièrement de l'hydroélectricité. Basé sur les données moyennes par m<sup>2</sup> de plancher pour le résidentiel et le commercial au Québec, le besoin en énergie d'opération des bâtiments pour la première année a été calculé (RNC, 2015). L'intensité moyenne par m<sup>2</sup> de plancher pour le résidentiel est de 0,81 GJ et de 1,28 GJ pour le commercial. Avec une surface résidentielle de

12 160 m<sup>2</sup> et 1 606 m<sup>2</sup> de surface commerciale, les besoins en énergie pendant la première année d’opération sont multipliés par 60 années (durée de vie des bâtiments). Le Tableau 13 présente la consommation d’énergie d’opération par type de bâtiment et par type d’espace.

La consommation d’énergie est identique dans les espaces commerciaux des deux bâtiments, en raison du fait que les mêmes matériaux sont utilisés pour la structure et l’enveloppe. Dans le cas des espaces résidentiels, ce besoin en énergie est 1 % plus élevé dans le bâtiment en béton. Ceci découle d’une analyse des ponts thermiques des balcons. Ils existent dans les deux bâtiments mais sont négligeables dans le bâtiment en bois, en raison de la très faible surface de connexion entre la structure en acier des balcons et les dalles en bois lamellé-croisé. Dans le bâtiment en béton, la surface de connexion entre dalles et balcon est plus importante, car tous deux sont coulés au même moment, c.-à-d. les balcons en béton sont une continuité des dalles vers l’extérieur. Il existe des solutions pour réduire les pertes d’énergie via les ponts thermiques dans le bâtiment en béton. Celle considérée ici est le produit isolant rigide *Isokorb*<sup>MD</sup> de la compagnie *Schöck*.

En général, les pertes d’énergie dans le bâtiment peuvent atteindre 30 % de la consommation annuelle. Selon la compagnie *Schöck*, les pertes d’énergie liées aux ponts thermiques balcon-béton s’estiment à 14 %. L’utilisation des produits isolants rigides *Isokorb*<sup>MD</sup> permet de réduire ces pertes par 80 %. Ceci se traduit en une perte de 3 % avec utilisation du matériau *Isokorb*<sup>MD</sup>. En référence au bâtiment en bois, la consommation annuelle est de 9 849,6 GJ; les 30 % de perte annuelle représentent 2 955 GJ et les 3 % de 30 % représentent 88,65 GJ. À égale efficacité énergétique pour les deux bâtiments, cette perte de 3 % en présence des *Isokorb*<sup>MD</sup> dans le bâtiment en béton représente une consommation annuelle additionnelle de 1 % (soit 88,65 GJ/an pour 5 319 GJ/60 ans).

Tableau 13. Consommation en énergie des bâtiments

Espaces	Consommation (GJ/60 ans)	
	Bâtiment bois	Bâtiment béton
Résidentiel	590 976	596 295
Commercial	123 341	123 341

#### 5.4.4 Besoin en eau (B7)

La consommation en eau, tout comme l’énergie, diffère d’un secteur à l’autre. Dans la littérature, le Québec est reconnu pour sa grande consommation en eau par rapport aux autres provinces du Canada. Selon une étude menée par l’université McGill, la consommation d’eau moyenne journalière par habitant, dans le secteur résidentiel est de 225 litres/m<sup>2</sup>/jour contre 10 litres/m<sup>2</sup>/jour dans le secteur commercial. Les ratios d’utilisation dans le résidentiel sont donnés dans la Illustration : Genevieve Young - Université McGill

Figure 9 ci-dessous. Le calcul de cette consommation est basé sur le nombre d’habitants dans le bâtiment. Un ratio de 1,87 habitant par logement a été calculé pour chacun des deux bâtiments. La consommation en eau des différents espaces pendant 60 ans, représentée dans le Tableau 14, est identique pour les deux bâtiments.

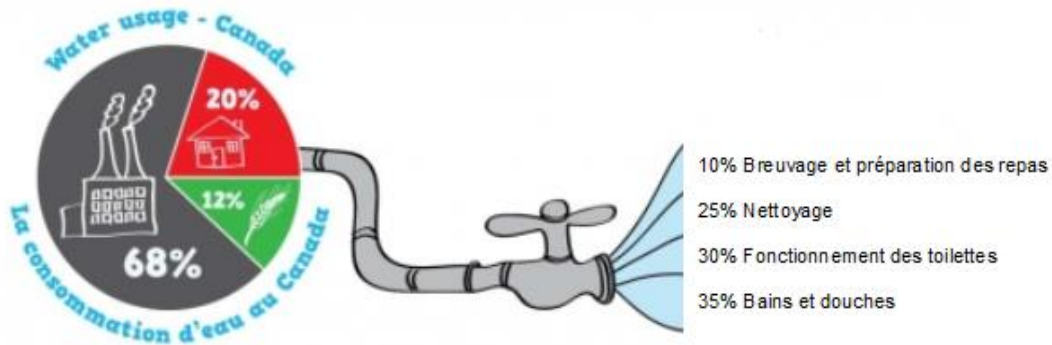


Illustration : Genevieve Young - Université McGill

Figure 9. Consommation moyenne d'eau dans le secteur résidentiel

Tableau 14. Consommation en eau des différents espaces des bâtiments

Espace	Consommation en eau (m <sup>3</sup> /60 ans)
Résidentiel	1 305 787
Commercial	338 355

## 5.5 La fin de vie du bâtiment

L'étape de fin de vie inclut les modules démolition (C1), transport des matériaux de démolition vers les centres de tri (C2), tri ou séparation des matériaux récupérés (C3) et gestion des déchets (C4). Cette étape requiert principalement de l'énergie comme ressource dans sa réalisation.

### 5.5.1 La démolition (C1)

Dans la définition du scénario de démolition, l'entreprise spécialisée en démolition de bâtiments « DémoSpec » a été choisie pour sa proximité au site de construction et son expérience. Elle se situe à 22,4 km du site de démolition. Les données d'énergie de transport de la flotte d'équipement vers le site et l'énergie de démolition sont des données secondaires. Elles découlent d'une étude menée par l'institut Athena (Athena, 1997). Pour la démolition des bâtiments analysés dans cette étude, un ensemble de 12 pièces d'équipement a été considéré (1 pelle hydraulique, 1 chargeuse-pelleteuse, 1 camion-benne, 1 grue automotrice et 1 grue montée par camion, 1 nacelle articulée, 1 camion-remorque, 1 compresseur atlas XAS, 1 broyeur de bois, 1 concasseur de béton, 1 scie pour armature et 1 pick-up). L'énergie de déplacement de chaque pièce d'équipement est calculée suivant l'équation (3) suivante :

$$E_t = \frac{C \times D \times nV \times F_a}{F_b} \quad \text{Équation (3)}$$

où :

$E_t$  est l'énergie de transport consommée (kWh),

$C$  est la consommation (l/km),

$D$  est la distance,

$nV$  est le nombre de voyages,

$F_a$  est le facteur de conversion de litre (mégajoule (MJ)), et

$F_b$  est le facteur de conversion de MJ en kWh.

Selon l'étude réalisée par l'institut Athena, l'énergie consommée pendant la démolition dépend du type de gestion des déchets (recyclage ou réutilisation) (Athena, 1997). Dans ce cas d'étude, l'énergie considérée correspond à celle de démolition aux fins de recyclage, parce que en moyenne elle est moins énergivore que la démolition aux fins d'une réutilisation. Sur cette lancée, la consommation d'énergie de démolition pour les bâtiments se calcule suivant l'équation (4) suivante :

$$E_d = \frac{C_m \times Q}{F_b} \quad \text{Équation (4)}$$

où :

$E_d$  est l'énergie de démolition,

$C_m$  est la consommation moyenne d'énergie par kg de matériaux démolis (MJ/kg),

$Q$  est la quantité de matériaux démolis (kg), et

$F_b$  est le facteur de conversion de MJ en kWh.

Les Tableau 15 et Tableau 16, présentent respectivement les données d'énergie de déplacement et d'énergie de démolition, pour les deux bâtiments étudiés. La consommation d'énergie de déplacement des équipements de démolition vers le site est la même pour les deux bâtiments. Pour l'exercice de démolition, les moyennes d'énergie consommée par kg de matériau démolis sont de 0,419 MJ et 0,107 MJ respectivement, pour la structure en bois et celle en béton (Athena, 1997). Dans le cas du bâtiment en bois, la consommation moyenne d'énergie considérée dans l'analyse est différente, en raison de la présence d'un étage en béton (RDC). Les ratios d'énergie sont calculés à 1/8 sur base de l'énergie de démolition d'une structure en béton et 7/8 sur base de l'énergie de démolition d'une structure en bois. L'énergie moyenne consommée par kg de matériau pour la démolition du bâtiment en bois est de 0,38 MJ. L'énergie consommée pour la phase de démolition est le résultat de la consommation unitaire multiplié par la quantité (kg) de matériaux démolis. Les quantités sont 7 806 tonnes et 13 909 tonnes respectivement, pour les bâtiments en bois et en béton.

Tableau 15. Énergie de déplacement des équipements de démolition

Équipements	Consommation (MJ)	Sources
Pelle hydraulique (Caterpillar 325L)	11 160	FPI, 2014
Chargeuse-pelleteuse (Caterpillar 426B)	11 160	FPI, 2014
Camion-benne	834	Athena, 1997
Grue montée par camion	433	Athena, 1997
Grue automotrice	433	Athena, 1997
Camion-remorque	834	Athena, 1997
Broyeur de bois	834	Athena, 1997
Concasseur de béton	11 160	Athena, 1997
Pick-up	388	Athena, 1997
Total	37 234	

Tableau 16. Énergie de démolition

Type de bâtiment	Consommation (GJ)	Sources
Bâtiment bois	2 966	Athena, 1997
Bâtiment béton	1 488	Athena, 1997

### 5.5.2 Le transport (C2)

Le transport des matériaux démolis vers les centres de tri, est assuré par des camions-bennes d'une capacité de 40 tonnes. La quantité de matériaux pour le bâtiment en bois est de 7 805,7 tonnes et de 13 909,4 tonnes pour le bâtiment en béton. La distance du transport est de 11,3 km (site du centre de tri); l'énergie de transport est respectivement 88 205 tkm pour le bâtiment en bois et 157 176 tkm pour le bâtiment en béton.

### 5.5.3 Le tri/séparation (C3)

Le module de tri est caractérisé par sa demande en énergie. Les matériaux issus de la CRD sont acheminés dans un centre de tri situé à 11,3 km du site de démolition. L'estimation de la consommation énergétique par tonne de matériaux triés est faite sur la base d'une étude menée aux États-Unis (Lewis, 2008). Selon cette étude, la demande en énergie par tonne de déchets triés est de 2 638 kWh. Cette consommation unitaire a été considérée pour calculer la demande totale en énergie de tri des matériaux, dont le processus de tri/séparation n'est pas répertorié dans le logiciel SimaPro. Les matériaux traités de cette façon sont l'aluminium, les isolants en fibres synthétiques, les membranes bitumineuses et les membranes plastiques. Le Tableau 17 présente les quantités de déchets de matériaux et l'énergie de tri par type de bâtiment.

Tableau 17. Énergie de tri des matériaux

Type de déchets	Quantité (tonne)	
	Bâtiment bois	Bâtiment béton
Aluminium	87	83
Isolants fibres synthétiques	16	12
Membranes bitume	209	209
Membranes plastiques	11	11
Total	324	317
Énergie de tri (kWh)	854 712	836 246

### 5.5.4 La gestion des déchets (C4)

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés pour la fin de vie des produits : le recyclage, la valorisation, la réutilisation, l'enfouissement et l'incinération. Le type de scénario de gestion des déchets influence la nature du produit chimique émis dans l'atmosphère. À titre d'exemple, la valorisation énergétique génère le CO<sub>2</sub> tandis que l'enfouissement génère du méthane (CH<sub>4</sub>). Dans ce cas d'étude, les fractions de déchets destinées à l'enfouissement et l'incinération sont analysées. Le recyclage, la valorisation énergétique et la réutilisation ne sont pas considérés parce qu'ils sont en dehors des limites du système étudié. La détermination des fractions de déchets enfouis ou incinérés est basée sur le rapport de Recyc-Québec (Recyc-Québec 2015) (Tableau 18).

Tableau 18. Types et taux (%) de gestion de déchets

Type de déchet	Bâtiment bois	Bâtiment béton	Recyclage (%)	Réutilisation (%)	Production énergétique (%)	Incinération (%)	Enfouissement (%)
	Quantité (tonnes)	Quantité (tonnes)					
Bois	1 508	56	37	-	62	1	-
Béton	3 969	11 933	97,1	-	-	-	2,9
Acier	954	1 245	100	-	-	-	-
Aluminium	87	83	100	-	-	-	-
Brique	452	429	97,1	-	-	-	2,9
Isolant fibre de verre	15	15	100	-	-	-	-
Isolant fibre synthétique	16	12	63,8	25,9	-	-	10,3
Membrane bitume	209	209	63,8	25,9	-	-	10,3
Membrane plastique	11	11	100	-	-	-	-
Verre	55	55	100	-	-	-	-
Gypse	959	692	100	-	-	-	-



Les quantités de matières enfouies ou incinérées présentées dans le Tableau 19 sont calculées sur la base de pourcentages indiqués au Tableau 18.

Tableau 19. Quantité de déchets recyclables après la démolition

Type de déchets	Quantité enfouie (tonnes)		Quantité incinérée (tonnes)	
	Bâtiment bois	Bâtiment béton	Bâtiment bois	Bâtiment béton
Bois	0	0	15	1
Béton	115	346	0	0
Brique	13	12	0	0
Isolants fibres synthétiques	2	1	0	0
Membrane de bitume	22	22	0	0

## 5.6 Description des analyses de sensibilités

La définition des différentes analyses de sensibilités se base sur des paramètres sensibles observés en cours de projet. Toutefois, les échanges en cours de projet avec les différents partenaires (Provencher Roy et L2C Experts-conseils) ont permis de mieux cerner et documenter les paramètres sensibles. Leurs choix et les justificatifs sont présentés dans le Tableau 20.

L'analyse de sensibilité 1 a été définie sur la base des observations faites lors de la ventilation par composante du bâtiment des matériaux acier dans le bâtiment en bois. De cette ventilation de matériaux, il en est sorti que près de 75 % de l'acier contenu dans le bâtiment en bois tel qu'analysé est localisé dans les murs (enveloppe et cloison) sous forme d'acier non structural (colombage). Cependant, l'acier étant un matériau à fortes émissions de GES comparativement au béton ou au bois, cette analyse de sensibilité avait pour objectif de mettre en évidence les impacts de la substitution du colombage en acier par le colombage en bois sur les résultats. L'inventaire du cycle de vie est présenté en Annexe VI.

Sur la base des éléments mis en évidence dans la section 4.3 (Adaptation des bâtiments), il avait été mentionné que les plafonds du bâtiment en béton contenaient 75 % moins de matériaux. Dans le but d'investiguer les impacts associés aux matériaux utilisés dans les plafonds, l'analyse de sensibilité 2 a été définie. En effet, elle considère la même quantité de matériaux de construction (panneaux de gypse, acier et aluminium) au niveau des plafonds des deux bâtiments. L'inventaire du cycle de vie est présenté en Annexe VII.

Comme défini dans la section 4.3, la différence de 6 pouces de hauteur par étage entre le bâtiment en bois et le bâtiment en béton est le fruit des plafonds plus bas, observés dans le bâtiment en bois. Cette différence de hauteur affecte toutes les composantes verticales (enveloppe, cloisons et escaliers) du bâtiment. Cependant, étant du ressort de l'urbanisme, elle pourrait varier d'une ville à une autre. De fait, cette considération pourrait s'annuler. Pour tester l'annulation de ce différentiel de hauteur entre les étages des deux bâtiments, cette analyse de sensibilité 3 a été définie et les impacts sur les résultats, interprétés. L'inventaire du cycle de vie est présenté en Annexe VIII.

La définition de l'analyse de sensibilité 4 repose sur le fait que le bâtiment en béton est un bâtiment fictif, fonctionnellement équivalent. Dans un projet de construction, les marges d'erreur acceptables sont fonction

des étapes d'avancement. Elles varient de 25 % à 80 % en début de projet pour se réduire à 5 % en phase d'exécution ou de réalisation. Bien que les volumes de béton et d'armature du bâtiment en béton aient été estimés aux meilleures des connaissances des professionnels et sur la base des pratiques courantes dans le domaine de la construction, il a été objectif de définir une analyse de sensibilité autour de ces matériaux. De fait, les analyses de sensibilité 4 et 5 considèrent une quantité de +25 % et -25% de volume de béton structural et d'armature dans le bâtiment en béton. L'inventaire du cycle de vie est présenté en Annexe IX. Tout comme les sensibilités, les inventaires de cycle de vie des structures sont présentés en Annexes IV.

Tableau 20. Paramètres sensibles analysés

Types	Paramètres sensibles	Justificatifs	Application
Sensibilité 1	Acier dans les murs	Plus de 70 % de l'acier du bâtiment en bois se localise dans les cloisons et l'enveloppe	Remplacement du colombage en acier par le colombage en bois (2x4)
Sensibilité 2	Acier, aluminium et gypse dans les plafonds	Quantité supplémentaire de matériaux dans les plafonds du bâtiment en bois	Égale quantité de matériaux dans les plafonds du bâtiment en béton
Sensibilité 3	Différence de 6 pouces de hauteur	Quantité supplémentaire de matériaux dans le bâtiment en bois	Égale quantité de matériaux dans l'enveloppe, les cloisons, les plafonds et les escaliers dans le bâtiment en béton
Sensibilité 4	Volume béton et armature	Impact GES production béton	+25 % volume béton et armature
Sensibilité 5	Volume béton et armature	Impact GES production béton	-25 % volume béton et armature

## 6. ANALYSE DES IMPACTS ACV

L'analyse des profils environnementaux est conduite selon deux méthodologies : TRACI 2.0 et IMPACT 2002+. La méthode nord-américaine TRACI a été la principale méthode d'analyse d'impact utilisée dans cette étude. Par contre la méthode européenne IMPACT 2002+ a été utilisée pour valider les résultats obtenus avec TRACI. Une caractéristique de la méthode TRACI est qu'elle se limite à un niveau d'évaluation intermédiaire des impacts environnementaux. Afin d'effectuer une validation appropriée, les catégories d'impacts considérées pour la méthode européenne ont été aussi les catégories intermédiaires (*Midpoint*).

### 6.1 Analyse de la qualité des données et processus modélisé

En analyse de cycle de vie, l'analyse de la qualité des données inventoriées est une étape importante, car elle a une influence sur la fiabilité des résultats. En plus elle est une exigence de la norme ISO 14044 (ISO 14044, 2006). Dans cette section, les différents critères de qualité de données sont analysés et présentés sous forme de tableaux. Les différents processus utilisés pour la modélisation des données d'inventaire sont aussi présentés sous forme de tableaux par étapes ou modules des étapes de cycle de vie des bâtiments.

### 6.2 Analyse de la qualité des données

Dans une ACV, la qualité des résultats est strictement reliée à la qualité des données d'inventaire et à la qualité de la méthode d'analyse utilisée. Pour faciliter l'évaluation de la qualité des données, différents indicateurs de qualité des données ont été développés (Weidema et Wesnaes, 1996). Une matrice de cinq (5) indicateurs de qualité telle que présentée au Tableau 21 reçoit des scores allant de 1 à 4 en fonction des caractéristiques de la donnée analysée. La description des critères d'évaluation qualitative de la qualité des données est présentée au Tableau 21.

Tableau 21. Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al. 1996)

Indicateurs	Description
Technologie	Mesure dans laquelle la donnée reflète la technologie réelle utilisée
Temps	Mesure dans laquelle la donnée reflète le temps (ex. l'année) ou l'âge de l'activité
Géographie	Mesure dans laquelle la donnée reflète la localisation géographique de l'activité (ex. pays ou site)
Complétude	Mesure dans laquelle la donnée est statistiquement représentative de l'activité : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprend le pourcentage des emplacements où des données sont disponibles et utilisées par rapport au nombre total où cette activité a lieu ; et</li> <li>• Inclut également les fluctuations saisonnières et les variations normales de la donnée.</li> </ul>
Fiabilité	Mesure la fiabilité de la source, des méthodes de collecte et des procédures de vérification utilisées

Tableau 22. Critères évaluation qualitative de la qualité des données (adaptés de Weidema et al. 1996)

Score de qualité	Technologie	Temps (T)	Géographie	Complétude	Fiabilité
Très bonne (Rang 1)	Même technologie utilisée	T < 3 ans	Même région	Provient de tous les sites pertinents et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales	Vérifiée et basée sur des mesures
Bonne (Rang 2)	Technologie utilisée similaire	T < 6 ans	Région similaire	Provient de 50 % des sites et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales	Vérifiée, partiellement basée sur des hypothèses ou non vérifiée, basée sur des mesures
Convenable (Rang 3)	Technologie utilisée différente	T < 10 ans	Région différente	Provient de moins de 50 % des sites et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales ou provient de plus de 50 % des sites, mais pour une durée plus courte	Non vérifiée, partiellement basée sur des hypothèses ou estimation qualifiée
Faible (Rang 4)	Technologie utilisée inconnue	T > 10 ans	Région inconnue	Provient de moins de 50 % des sites et pour une durée plus courte ou de représentation inconnue	Estimation non qualifiée

Les données primaires et données secondaires ainsi que les sources ont été différenciées et répertoriées dans le Tableau 23 et le Tableau 24.

Tableau 23. Sources des données primaires d'inventaire du cycle de vie

Étape du cycle de vie	Modules des étapes		Sources
<b>Construction</b>	A4	Transport	Entrepreneurs généraux; Provencher Roy; Sotramont; L2C Experts Conseils
	A5	Construction	Provencher Roy; Sotramont; L2C Experts Conseils; entrepreneurs généraux
<b>Production</b>	A1	Extraction	Modèle BIM développé par Provencher Roy
	A2	Transport	
	A3	Fabrication	
<b>Fin de vie</b>	C1	Démolition	Athena
	C2	Transport	FPInnovations

Tableau 24. Sources des données secondaires d’inventaire du cycle de vie

Étape du cycle de vie	Modules des étapes		Sources
<b>Production</b>	A1	Extraction	Athena Sustainable Materials Institute (2012a,b) Écoinvent v 3.3 Franklin and Associates (PRé Consultants, n.d)
	A2	Transport	
	A3	Fabrication	
<b>Construction</b>	A4	Transport	Écoinvent v 3.3
	A5	Construction	
<b>Opération</b>	B3	Réparation	Écoinvent v 3.3
	B4	Remplacement	
	B6	Énergie	
	B7	Eau	
<b>Fin de vie</b>	C1	Démolition	Écoinvent v 3.3
	C2	Transport	
	C3	Tri/séparation	
	C4	Traitement de déchets	

Au regard des indicateurs et des scores de qualité présentés dans le Tableau 21 et Tableau 22, l’analyse de la qualité des données utilisées dans cette étude a été effectuée et présentée par modules des étapes de cycle de vie, sous forme de la matrice de Weidema (

Tableau 25).

Les données primaires utilisées dans cette étude sont des données collectées de sources fiables. Elles proviennent du logiciel BIM et des interactions avec les différents professionnels partenaires du projet (

Tableau 25). La technologie BIM utilisée comme source de données des matériaux de construction est une technologie qui gagne de l’espace chez les professionnels du bâtiment. Géographiquement, circonscrites sur le territoire de la province de Québec, les données collectées sont récentes. En général, elles ont été obtenues entre 2017 et 2018. En effet, elles sont qualifiées de très bonnes (moins de 3 ans). Elles sont des données représentatives des pratiques courantes de l’industrie de la construction.

Pour les données secondaires quant à elles, en vue de la diversité des sources consultées et des hypothèses posées en cours d’analyse, la qualité est en général bonne (Tableau 27). Les bases de données consultées sont fiables et présentent en général des données moyennes. Les proxies utilisés dans la modélisation proviennent des bases de données Écoinvent et USLCl. Ils sont principalement de 2016 avec quelques exceptions de 2000 (contreplaqué), 2010 (panneaux de gypse) et 2014 (gravier). La région géographique est plus vaste que celle des données primaires. En ce sens que certains proxies traitent des données moyennes du reste du monde (RoW) tandis que d’autre, comme l’hydroélectricité présente des données provinciales (Québec). Les technologies généralement utilisées sont des celles récentes.

Tableau 25. Analyse de la qualité des données primaires

Critères de qualité des données	A1-A3	A4	A5	B3	B4	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Temps	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne
Situation géographique	Bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Technologies	Bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne
Précision	Bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne	Bonne
Complétude	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne

Tableau 26. Analyse de la qualité des données secondaires

Critères de qualité des données	A1-A3	A4	A5	B3	B4	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Temps	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Situation géographique	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Technologies	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Précision	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Très bonne	Très bonne	Bonne	Bonne
Complétude	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne	Bonne

### 6.3 Effets des incertitudes sur les résultats

En ACV, les incertitudes ont diverses origines. Elles peuvent être associées aux données d'inventaire tout comme à la méthode d'analyse des impacts. Bien que fortement préconisée par les normes qui régissent les ACV, l'analyse des incertitudes est peu détaillée dans les études publiées. Toutefois différents auteurs soulignent l'importance de la prise en compte des incertitudes dans une étude d'ACV, car elles ont un effet sur la fiabilité et la crédibilité des résultats (Jolliet et al. 2010, Durlinger et al. 2013). Dans une analyse de cycle comparative des produits ou services, l'effet des incertitudes sur les résultats affecte l'importance des différences relatives. De fait, les auteurs Humbert et al. ont publié à ce sujet des seuils minimaux ou différences relatives minimales significatifs en fonction de la catégorie d'impacts analysée. En d'autres termes, pour qu'une différence relative entre deux scénarios soit significative, elle doit être supérieure au seuil minimal indiqué par ces auteurs (Humbert et al. 2013). Le choix de TRACI comme méthode d'analyse d'impacts présente un double avantage. Le premier est le fait que cette méthode a été développée pour le contexte nord-américain tandis que le second fait référence aux catégories d'impacts qui la caractérisent. En fait, l'utilisation des catégories d'impacts intermédiaires dans une ACV, limite les incertitudes associées à la méthode d'analyse des impacts (Jolliet et al. 2010).

Toutefois, il est important de souligner que ces seuils ont été définis selon la méthode d'analyse d'impacts européenne IMPACT 2002+. La méthode nord-américaine TRACI et IMPACT 2002+ sont deux méthodes qui peuvent produire des résultats différents sur base absolue. Cependant comparées en valeurs relatives, les différences entre deux scénarios sont quasi non significatives. Sur la base de cette cohérence relative, les différences minimales peuvent être utilisées pour les catégories d'impacts intermédiaires similaires à ceux générés avec la méthode TRACI (Tableau 27)

Tableau 27. Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative (Humbert et al. 2013)

Incertitudes liées à la modélisation d'impact			
Impact 2002+	TRACI	Niveau d'incertitudes	Écart minimal requis
Effets cancérigènes	Effets cancérigènes	Élevé	± 90 %
Effets non-cancérigènes	Effets non-cancérigènes	Élevé	± 90 %
Effets respiratoires (volatiles)		Faible	± 30 %
Effets respiratoires (particules)	Effets respiratoires	Moyen	± 50 %
Rayonnement ionisant	-	Élevé	± 80 %
Destruction de la couche d'ozone	App. de la couche d'ozone	Moyen	± 50 %
Écotoxicité aquatique	Écotoxicité	Élevé	± 90 %
Écotoxicité terrestre		Très élevé	± 90 %
Acide terrestre / nutriment	-	Élevé	± 80 %
Occupation de la terre	-	Élevé	± 80 %
Acidification aquatique	Acidification	Faible	± 30 %
Eutrophisation aquatique	Eutrophisation	Faible	± 30 %
Changement climatique	Réchauffement climatique	Faible	± 10 %
Énergie non renouvelable	Ép. des ressources fossiles	Faible	± 10 %
Extraction des minerais	-	Moyen	± 50 %

## 7. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Cette section présente les résultats des analyses de cycle de vie comparatives réalisées. Comme mentionné à la section 4.4, différents éléments du bâtiment ont été exclus de l'inventaire pour plusieurs raisons. Les raisons ont été mentionnées dans la même section 4.2. Compte tenu de ces exclusions, et des spécificités de l'étude (voir section 4.3), il serait prudent de ne pas généraliser les résultats de cette étude, car elle demeure une étude de cas. Ceci étant dit, les résultats de l'analyse des profils environnementaux sont présentés sous plusieurs perspectives répertoriées dans le Tableau 28 :

Tableau 28. Scénarios et sensibilités analysés

Id	Types	Descriptions
A	Structure 1	Structure du bâtiment de référence
B	Structure 2	Structure du bâtiment équivalent béton/acier
C	Scénario 1	Bâtiment Arbora C
D	Scénario 2	Équivalent en béton/acier
E	Sensibilité 1	Bâtiment Arbora C avec colombage en bois (2x4)
F	Sensibilité 2	Superficie plafond égale dans le bâtiment béton
G	Sensibilité 3	Enveloppe, plafonds, cloisons et escaliers égaux dans le bâtiment béton/acier
H	Sensibilité 4	+ 25 % de béton/acier dans le bâtiment équivalent en béton/acier
I	Sensibilité 5	- 25 % de béton/acier dans le bâtiment équivalent en béton/acier

Les comparaisons analysées sont :

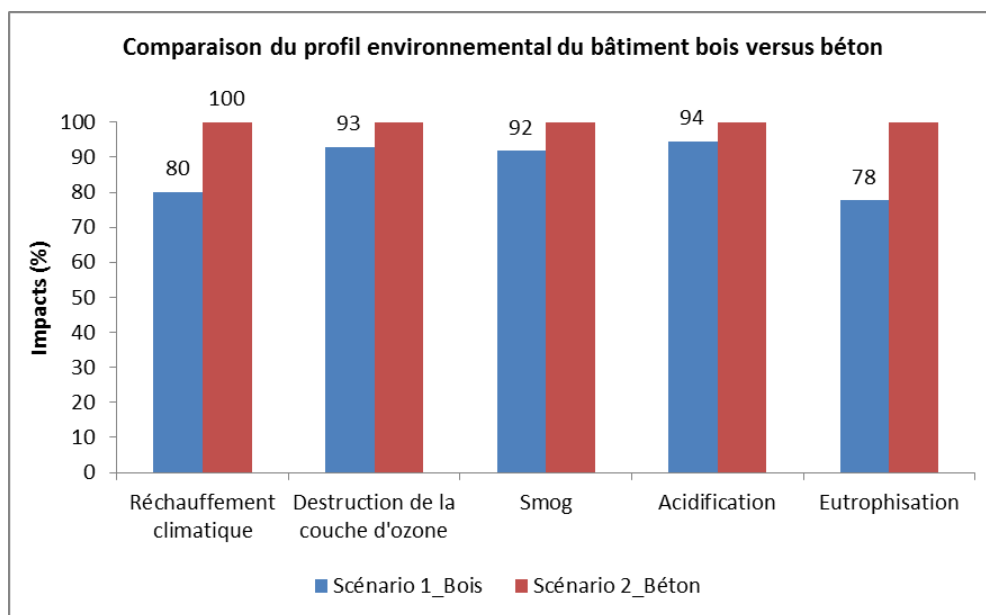
- Structure 1 versus structure 2 (A versus B);
- Scénario 1 versus scénario 2 (C versus D);
- Sensibilité 1 versus scénario 2 (E versus D);
- Sensibilité 2 versus scénario 1 (F versus C);
- Sensibilité 3 versus scénario 1 (G versus C);
- Sensibilité 4 versus scénario 1 (H versus C);
- Sensibilité 5 versus scénario 1 (I versus C).

Pour chaque comparaison, les catégories d'impacts suivantes sont analysées : réchauffement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation.

### 7.1 Comparaison – Scénario 1 versus Scénario 2

Analysé sur la partie hors sol (du RDC au 8e étage), le profil environnemental comparatif des deux bâtiments indique une empreinte environnementale du bâtiment en bois plus basse de 6 % à 22 %, par rapport à celle du bâtiment en béton, en fonction du type de catégories d'impacts analysées (Figure 10). En référence aux travaux d'Humbert et al., il a été possible de dire que les différences relatives entre les deux bâtiments pour toutes les catégories d'impacts analysées ne sont pas significatives, à l'exception de la catégorie réchauffement climatique (Tableau 27) (Humbert et al. 2010). La catégorie d'impact réchauffement climatique est 20 % inférieure pour le bâtiment en bois en comparaison au bâtiment en béton. Les émissions de GES pour le bâtiment en bois sont de 6,9 kt équivalent CO<sub>2</sub>, comparées à 8,6 kt équivalent CO<sub>2</sub> pour le bâtiment en

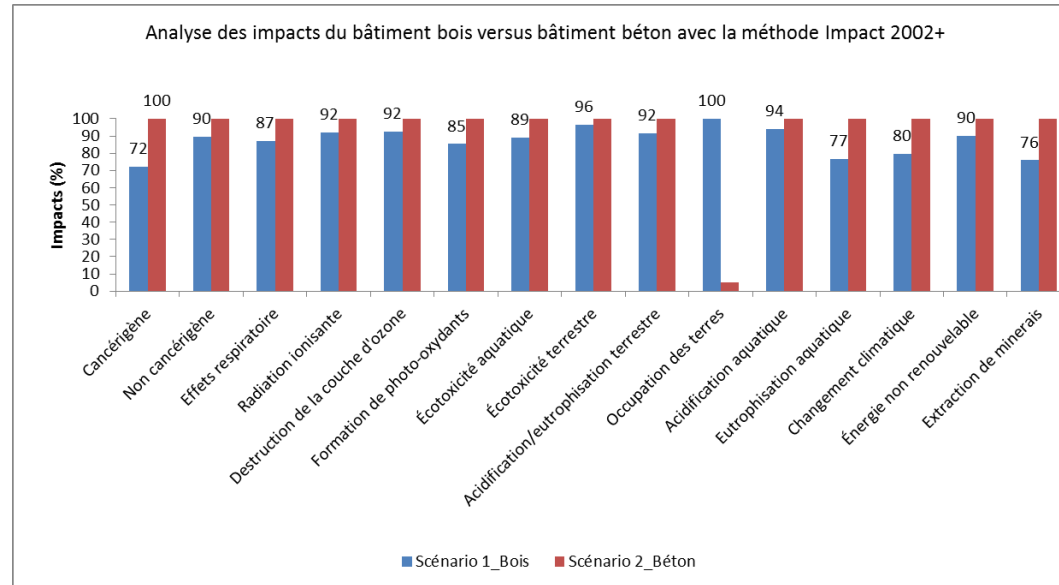
béton. Cette différence d'émissions des GES entre les deux bâtiments correspond à des émissions évitées de près de 1,7 kt équivalent CO<sub>2</sub>. Pour la validation des résultats obtenus avec la méthode d'analyse d'impact TRACI, les données modélisées ont été analysées avec la méthode d'analyse d'impact « IMPACT 2002+ ». Les résultats obtenus avec la méthode IMPACT 2002+ corroborent les résultats obtenus avec la méthode TRACI, pour les catégories d'impacts analysées (Figure 11).



Catégories d'impacts	Unité	Bâtiment 1_Bois	Bâtiment 2_Béton	Différence
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	1,75E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	9,85E-01	1,06E+00	7,74E-02
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	5,60E+04
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	4,35E+03
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	6,17E+03

Figure 10. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton; analysés avec la méthode TRACI

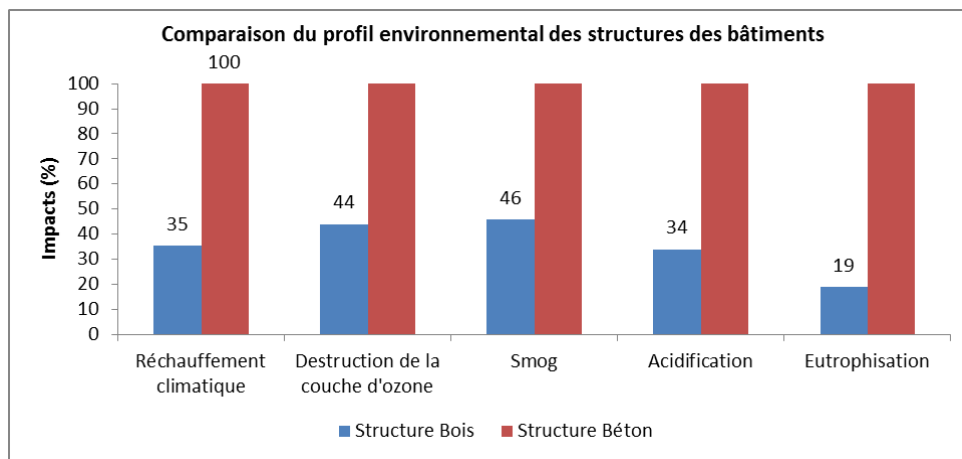




Catégorie d'impact	Unité	Bâtiment Bois	Bâtiment Béton
Cancérigène	kg C2H3Cl eq	4,20E+05	5,82E+05
Non cancérigène	kg C2H3Cl eq	3,26E+05	3,63E+05
Effets respiratoires	kg PM2.5 eq	1,47E+04	1,68E+04
Radiation ionisante	Bq C-14 eq	2,63E+07	2,86E+07
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	7,65E-01	8,28E-01
Formation de photo-oxydants	kg C2H4 eq	2,92E+03	3,42E+03
Écotoxicité aquatique	kg TEG eau	1,18E+09	1,32E+09
Écotoxicité terrestre	kg TEG sol	5,56E+08	5,76E+08
Acidification/eutrophisation terrestre	kg SO2 eq	1,86E+05	2,03E+05
Occupation des terres	m2org.arable	5,28E+06	2,56E+05
Acidification aquatique	kg SO2 eq	7,08E+04	7,51E+04
Eutrophisation aquatique	kg PO4 P-lim	8,22E+03	1,07E+04
Changement climatique	kg CO2 eq	6,79E+06	8,54E+06
Énergie non renouvelable	MJ primaire	9,03E+07	1,00E+08
Extraction de minerais	MJ surplus	3,69E+06	4,86E+06

Figure 11. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton; analysés avec la méthode Impacts 2002+

Les résultats de l'analyse du profil environnemental des structures des deux bâtiments sont présentés à la Figure 12. Pour toutes les catégories d'impacts analysées, la structure en bois montre le plus bas profil environnemental, comparé à la structure en béton. Pour la catégorie réchauffement climatique, les émissions de GES de la structure en bois sont 65 % plus basses que celles de la structure en béton. Ceci se traduit en des émissions évitées de 4,4 kt équivalent CO<sub>2</sub>.



Catégorie d'impacts	Unité	Structure Béton	Structure Bois	Différence
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,78E+06	2,40E+06	4,38E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	1,18E+00	5,21E-01	6,62E-01
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	4,53E+05	2,07E+05	2,46E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	2,82E+04	9,57E+03	1,86E+04
Eutrophisation	kg N eq	1,13E+04	2,13E+03	9,15E+03

Figure 12. Comparaison des impacts environnementaux : structure en bois versus structure en béton

## 7.2 Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie des bâtiments

L'analyse de contribution de chaque étape du cycle de vie est présentée à la Figure 13 pour le bâtiment en bois et à la Figure 14 pour le bâtiment en béton. Pour toutes les catégories d'impacts analysées, l'étape de production des matériaux est la plus importante contributrice aux impacts totaux de cycle de vie des bâtiments analysés. Elle est suivie des étapes d'opération, de fin de vie et de construction. Pour la catégorie d'impact réchauffement climatique, l'analyse de contribution indique que l'étape de production des matériaux (A1-A3) est la plus importante contributrice, avec 64,6 % pour le bâtiment en bois et 71,8 % pour le bâtiment en béton. Les émissions des GES associées à la production des matériaux sont de 4,5 kt équivalent CO<sub>2</sub> pour le bâtiment en bois versus 6,3 kt équivalent CO<sub>2</sub> pour le bâtiment en béton. Dans la production des matériaux du bâtiment en béton, le béton est le plus important contributeur avec 24,4 % des émissions de GES, tandis que pour le bâtiment en bois, c'est l'acier qui est le plus important contributeur avec 16,9 %. Les différents arbres de processus des deux bâtiments liés à la catégorie réchauffement climatique sont présentés en Annexes I et II.

Dans l'étape construction de bâtiment en bois, le transport des matériaux (A4) représente près de 2 % des émissions de GES. Les modules réparation (B3), remplacement (B4) sont égaux dans les deux bâtiments. Ils sont respectivement responsables de 3 % et de 6 % des émissions GES relative de l'étape d'opération d

bâtiment de cette étape. Cependant, les émissions GES associées à la consommation énergies représentent environ 12 % à 15 % et celles associées à la consommation d'eau représentent environ 2 % à 3 % des émissions GES totales relative de la phase d'opération des bâtiments étudiés.

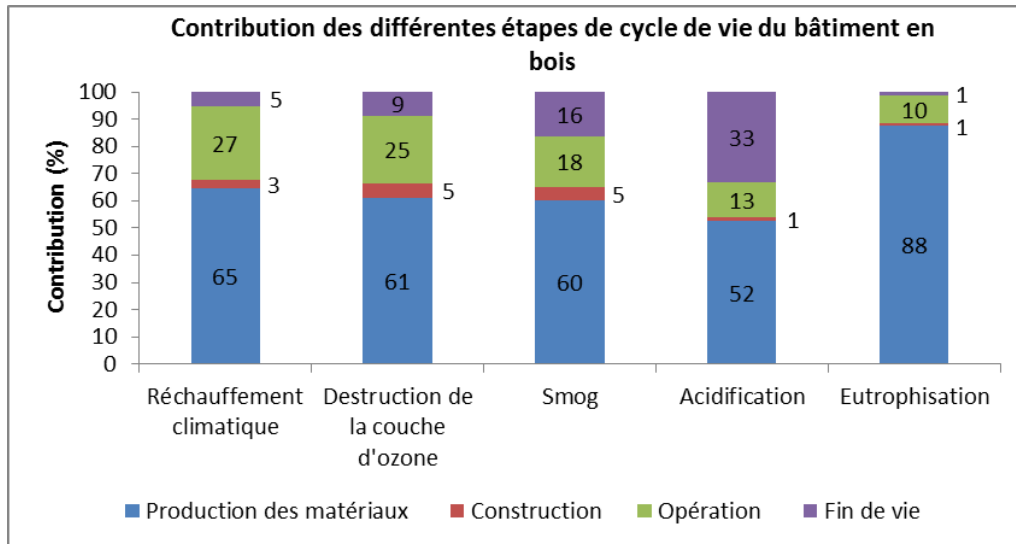


Figure 13. Contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment en bois

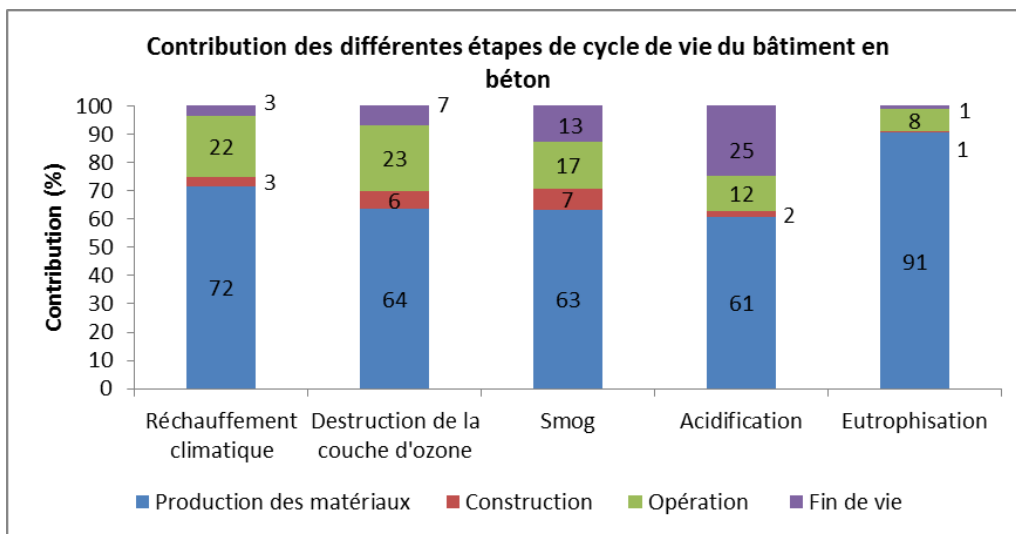


Figure 14. Contribution des étapes du cycle de vie du bâtiment en béton

### 7.3 Analyse des émissions de GES attribuables à la production des matériaux

L'analyse des émissions de GES de l'étape du cycle de vie production des matériaux est présentée à la Figure 15. Dans cette figure, tous les matériaux utilisés dans la construction des deux bâtiments y sont représentés. Ils sont regroupés comme présentés dans l'Annexe V. Les matériaux illustrés sont le résultat de l'agrégation des différents matériaux utilisés pour la construction des bâtiments analysés (voir Annexe III). Les émissions de GES liées à la production du béton structural dépassent celles de tous les autres matériaux, en raison des émissions

GES considérables associées à la production du ciment par rapport au bois d'ingénierie. Cependant, le volume de béton structural utilisé dans le bâtiment en béton a été le principal facteur de cette différence. En effet, le volume de béton structural utilisé dans le bâtiment en béton est près de 8 fois celui utilisé dans le bâtiment en bois. Ce volume équivaut à 3 808 m<sup>3</sup> dans le bâtiment en béton et à 483 m<sup>3</sup> dans le bâtiment en bois, car le béton structural est utilisé pour la structure des 8 étages du bâtiment en béton tandis qu'il est utilisé uniquement au RDC dans le bâtiment en bois. Elles représentent 24,4 % des émissions totales de GES pour le bâtiment en béton. Les matériaux acier et aluminium sont en seconde et troisième position, avec des émissions de GES estimées respectivement à 17,5 % et 11,9 %. Pour le bâtiment en bois, les plus importantes émissions proviennent de la production de l'acier (16,9 %) et de l'aluminium (14,9 %). Les émissions associées à la production du bois sont estimées à 3,4 %.

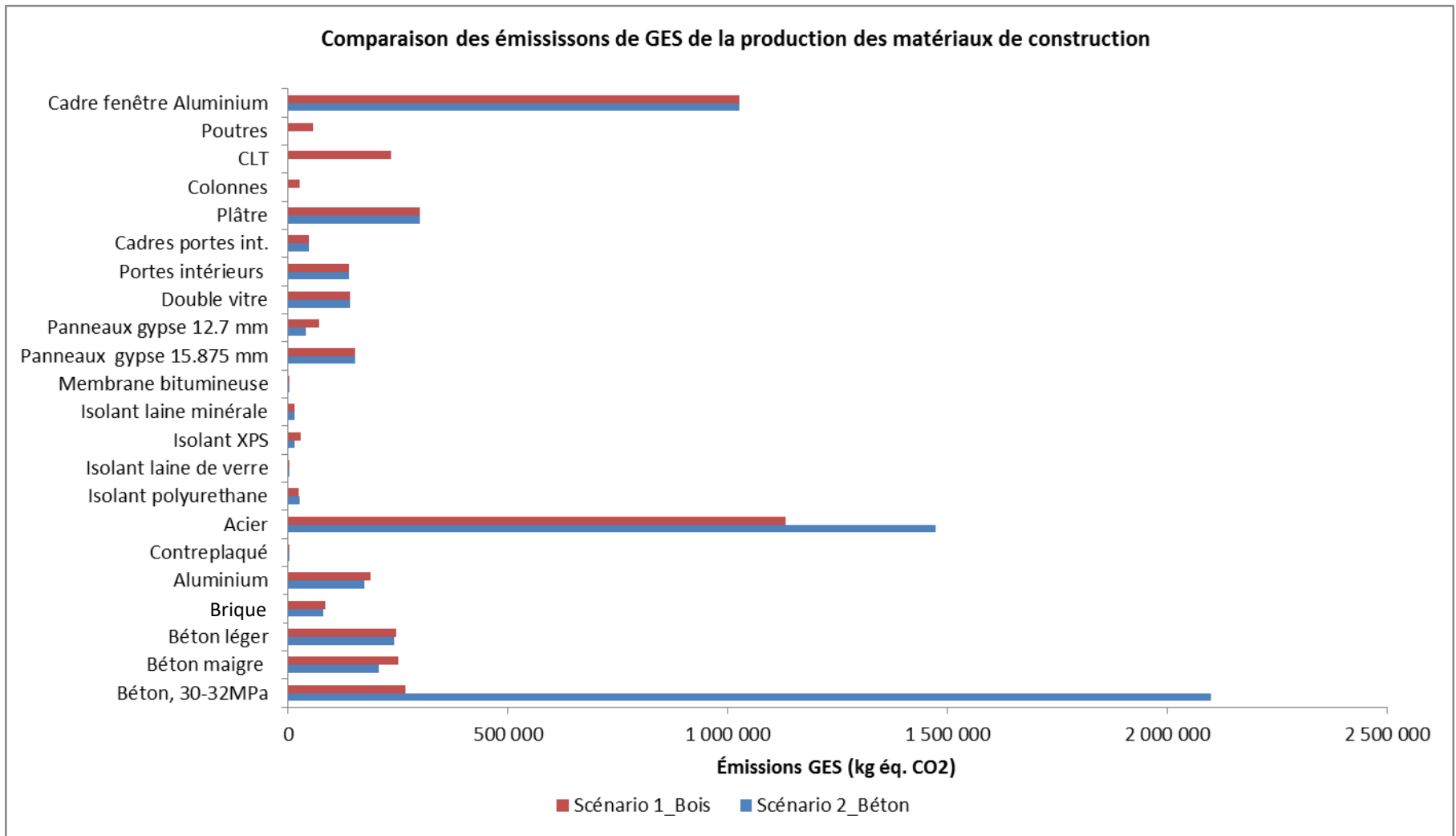
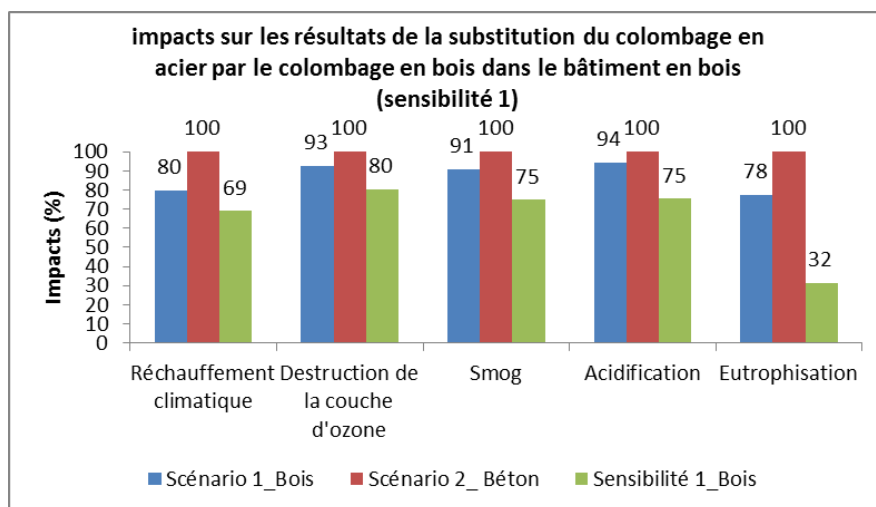


Figure 15. Comparaison des émissions de GES des de la production des matériaux de construction

## 7.4 Impacts de l'analyse de sensibilité 1 sur les résultats

La substitution du colombage en acier léger par le colombage en bois (2x4) dans le bâtiment en bois engendre des variations autour des résultats du bâtiment en bois (scénario 1)(Figure 16). De manière générale, cette substitution engendre des variations relatives de 13 %, 13 %, 18 %, 20 % et 59 % respectivement, pour les catégories changement climatique, destruction de la couche d'ozone, smog, acidification et eutrophisation. Au regard des seuils de valeur significative indiqués par Humbert et al. les variations relatives pour la catégorie changement climatique et eutrophisation sont significatives (Humbert et al. 2013). Pour la catégorie changement climatique, cette variation correspondrait à des émissions GES évitées de 0,93 kt équivalent CO<sub>2</sub> si le code du bâtiment actuel autorisait cette pratique dans la construction des bâtiments de grande hauteur en bois.

Dans cette analyse de sensibilité 1, la différence relative significative au niveau de la catégorie eutrophisation est principalement causée par le changement du matériau acier par le matériau bois. Une analyse d'impacts avec la méthode TRACI, des processus de production de 1 kg de chaque matériau (acier et bois) indique que les émissions de kg éq. N sont de 1,72<sup>E-2</sup> pour l'acier et 6,35<sup>E-6</sup> pour le bois. En effet, les émissions de l'acier sont 2 701 fois celles du bois. Cependant, l'utilisation de deux bases de données différentes (Écoinvent et ELCD) pour ces deux matériaux principaux dans la modélisation de ce paramètre sensible (colombage dans murs et cloisons) pourrait aussi contribuer. Pour évaluer l'effet des différentes bases de données utilisées sur les résultats obtenus, une sensibilité a été analysée autour des bases de données. Dans la section suivante, les deux matériaux ont été sélectionnés dans la même base de données afin de juger de la robustesse des conclusions.



Catégories d'impacts	Unité	Scénario 1_Bois	Scénario 2_Béton	Sensibilité 1_Bois
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	5,95E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	9,85E-01	1,06E+00	8,55E-01
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	4,67E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	5,66E+04
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	8,68E+03

Figure 16. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois avec colombage en bois versus bâtiment en béton

#### 7.4.1 Analyse de sensibilité autour du processus de modélisation issu de la base ELCD et Écoinvent

Dans l'analyse de sensibilité 1 présentée ci-dessus, le processus de production du bois d'œuvre modélisé est issu de la base de données ELCD. De fait, le processus modélisé est le suivant : « *Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S* ». Dans la vérification de l'influence du choix de la base de données dans laquelle provient le processus de production du bois d'œuvre modélisé, cette sensibilité a été analysée. De ce fait, le processus de production du bois d'œuvre précédemment sélectionné dans la base de données ELCD a été remplacé par un autre processus de production du bois d'œuvre issu de la base de données Écoinvent. Le processus modélisé est le suivant : « *Sawnwood, board, softwood, raw, dried (u=20%) {CA-QC} | board, softwood, raw, air drying to u=20% | Alloc Def, U* ». À partir de cette considération, les résultats de la nouvelle analyse de sensibilité 1 (Figure 17) n'ont montrés aucune différence significative comparativement aux résultats présentés à la Figure 16. Ceci étant dit, dans ce cas spécifique et à la lumière des résultats obtenus, il est possible d'affirmer que le changement de base de données pour le processus de production du bois d'œuvre n'a pas d'influence significative sur la différence relative significative observée dans cette analyse de sensibilité au niveau de la catégorie d'impact eutrophisation.

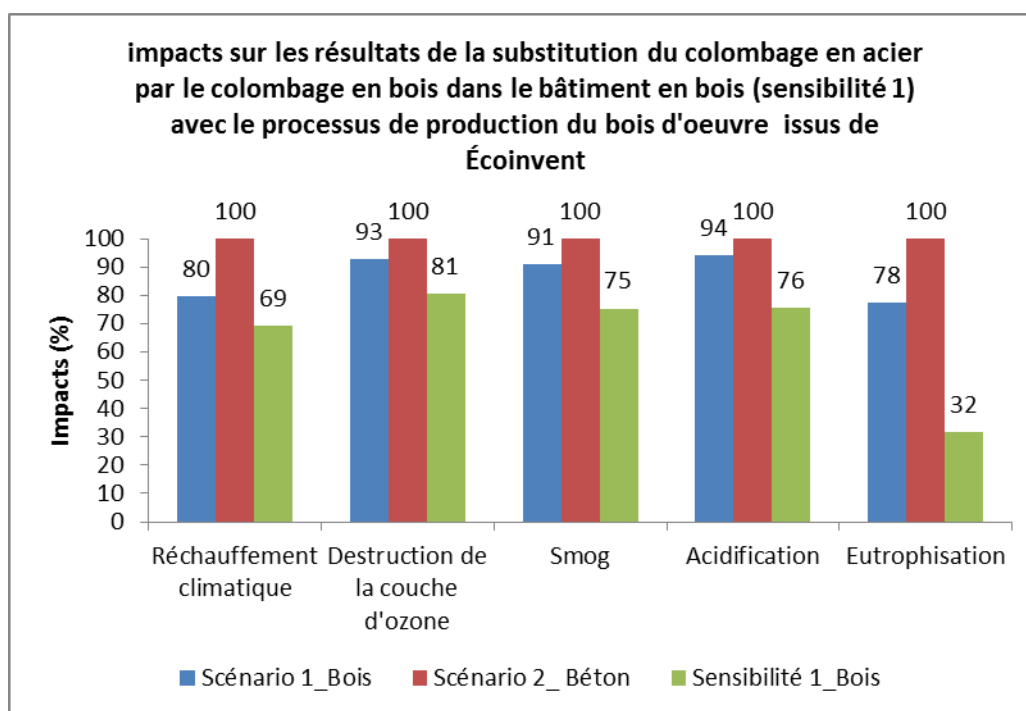
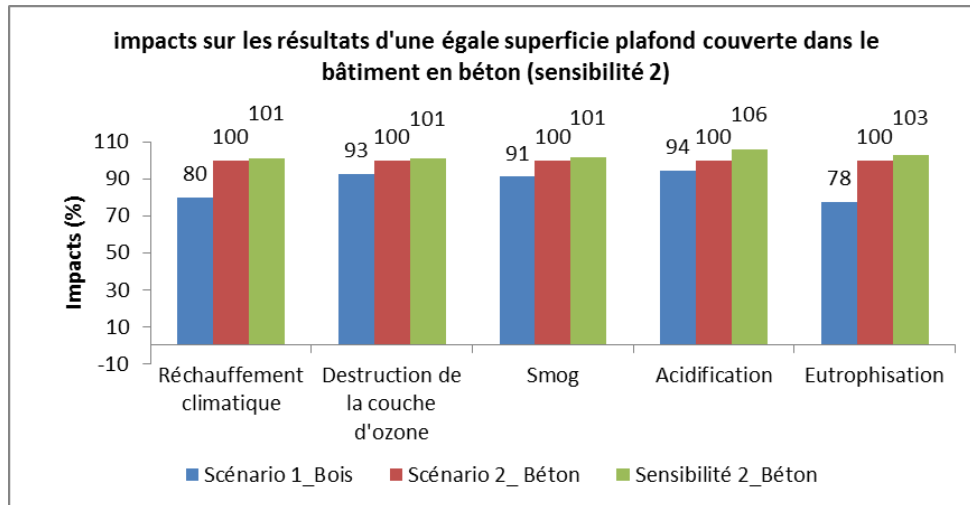


Figure 17. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois avec colombage en bois versus bâtiment en béton (processus de production du bois d'œuvre provient de la base de données Écoinvent)

#### 7.5 Impacts de l'analyse de sensibilité 2 sur les résultats

Tout comme l'analyse de sensibilité présentée à la section 7.4, cette analyse de sensibilité avait pour objectif de montrer l'impact sur les résultats de l'utilisation de la même quantité de matériaux (panneaux de gypses, suspensifs métalliques et aluminium) au niveau des plafonds dans les deux bâtiments analysés. Les résultats de cette analyse de sensibilité sont présentés dans la Figure 18. Les impacts des variations relatives (de 1 % à 6 %) autour des résultats ne sont pas significatifs, car inférieurs aux seuils minimaux requis (Humbert et al. 2013).



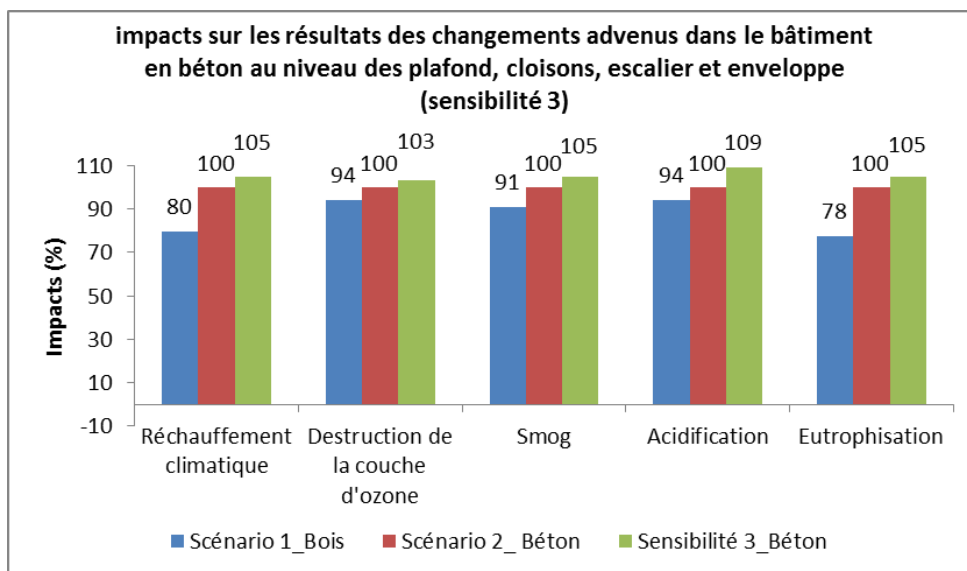
Catégories d'impacts	Unité	Scénario 1_Bois	Scénario 2_Béton	Sensibilité 2_Béton
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	8,71E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	9,85E-01	1,06E+00	1,07E+00
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	6,32E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	7,94E+04
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	2,83E+04

Figure 18. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec égale superficie de plafond couverte.

## 7.6 Impacts de l'analyse de sensibilité 3 sur les résultats

La différence de 6 pouces de hauteur par étage entre le bâtiment en bois et le bâtiment en béton, affecte toutes les composantes verticales (enveloppe, cloisons et escaliers). En effet, cette différence se traduit en une différence de quantité de matériaux de construction entre les deux bâtiments. La considération d'une hauteur égale entre les étages de chaque bâtiment se traduit en une augmentation de la quantité de matériaux dans le bâtiment en béton. De fait, tous les différents matériaux de construction impliqués dans les composantes affectées par cette différence de 6 pouces sont comptabilisés. Comme présenté dans la Figure 19, la considération de la même hauteur entre les étages n'affecte pas de manière significative les résultats (Humbert et al. 2013). En effet, les variations relatives des impacts de cette sensibilité sur les résultats varient entre 9 % et 3 % en fonction de la catégorie d'impact analysée par rapport au bâtiment en béton.



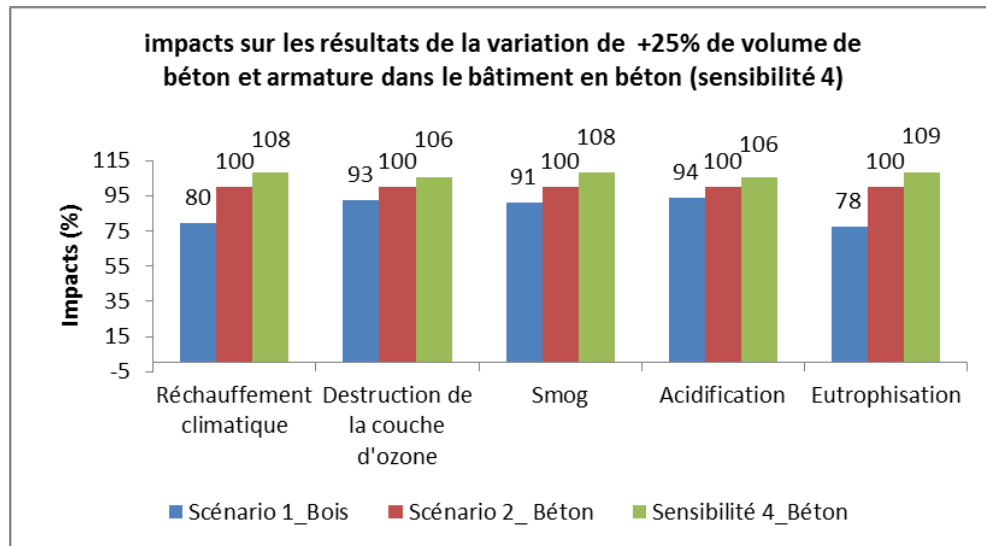


Catégories d'impacts	Unité	Scénario 1_Bois	Scénario 2_Béton	Sensibilité 3_Béton
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	9,04E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	1,00E+00	1,06E+00	1,10E+00
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	6,53E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	8,20E+04
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	2,89E+04

Figure 19. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec l'hypothèse d'égalité au niveau de l'enveloppe, superficie plafond couverte, cloisons et escaliers.

## 7.7 Impacts de l'analyse de sensibilité 4 sur les résultats

Comparée au scénario 2 (bâtiment béton), la sensibilité autour de l'augmentation de 25 % du volume de béton et armature dans le bâtiment en béton présente un impact relatif sur les résultats qui varie entre 9 % et 6 % en fonction de la catégorie d'impact considérée. Les émissions de GES du bâtiment en béton (scénario 2) varient de 8 % comparativement à l'analyse de sensibilité. Au regard des différences relatives significatives définies par Humbert et al. les variations relatives obtenues de cette analyse de sensibilité ne sont pas significatives, car respectivement inférieures à 10 %, 50 %, et 30 % pour les deux derniers tels que présentés dans la Figure 20 (Humbert et al. 2013). Toutefois, cette sensibilité indique une variation des émissions de GES de 704 056 kg équivalent CO<sub>2</sub> comparativement au scénario 2.

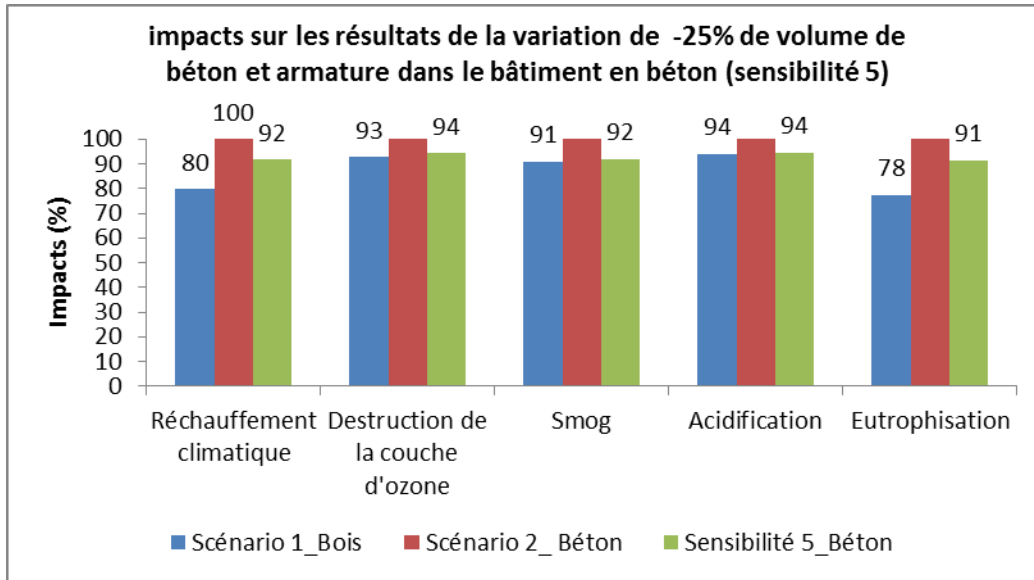


Catégories d'impacts	Unité	Scénario 1_Bois	Scénario 2_Béton	Sensibilité 4_Béton
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	9,33E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	9,85E-01	1,06E+00	1,12E+00
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	6,76E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	7,94E+04
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	2,99E+04

Figure 20. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec +25 % du volume de béton et armature

## 7.8 Impacts de l'analyse de sensibilité 5 sur les résultats

Comparée au scénario 2 (bâtiment béton), la sensibilité autour de la réduction de 25 % du volume de béton et armature dans le bâtiment en béton présente un impact relatif sur les résultats qui varie entre -9 % et -6 % en fonction de la catégorie d'impact considérée. Les émissions de GES du bâtiment en béton (scénario 2) varient de -8 % comparativement à l'analyse de sensibilité. Au regard des différences relatives significatives définies par Humbert et al., les variations relatives obtenues de cette analyse de sensibilité ne sont pas significatives (Figure 21) (Humbert et al. 2013). Toutefois, cette sensibilité indique une variation des émissions de GES de 704 056 kg équivalent CO<sub>2</sub> comparativement au scénario 2.



Catégories d'impacts	Unité	Scénario 1_Bois	Scénario 2_Béton	Sensibilité 5_Béton
Réchauffement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E+06	8,62E+06	7,91E+06
Destruction de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	9,85E-01	1,06E+00	1,00E+00
Smog	kg O <sub>3</sub> eq	5,68E+05	6,24E+05	5,73E+05
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E+04	7,51E+04	7,09E+04
Eutrophisation	kg N eq	2,13E+04	2,75E+04	2,52E+04

Figure 21. Comparaison des impacts environnementaux : bâtiment en bois versus bâtiment en béton, avec -25 % du volume de béton et armature

## 8. DISCUSSION

Le but de cette étude était de faire l'analyse du cycle de vie comparative des deux bâtiments de grande hauteur : bois versus béton/acier. Comme mentionné dans le premier paragraphe de la section résultats, cette étude est une étude de cas qui présente des spécificités qui lui sont propres. Comparativement aux études déjà publiées, l'originalité de cette analyse comparative des bâtiments se résume en la considération des spécificités en matière d'urbanisme (hauteur des bâtiments et type de revêtement mural extérieur en fonction du zonage, etc.), du code du bâtiment et de la réglementation en matière de sécurité incendie et des exigences de performance acoustique.

L'empreinte environnementale plus faible du bâtiment en bois comparée à celle du bâtiment en béton obtenue dans cette analyse corrobore des résultats présents dans la littérature (Grann, 2013; Durlinger et al. 2013; Robertson et al. 2012). De fait, l'hypothèse posée en début d'étude est validée par les résultats obtenus. De fait, le bâtiment en bois a un plus faible profil environnemental que le bâtiment en béton.

La considération des exigences du code du bâtiment (résistance au feu des matériaux et performance acoustique des planchers) et de la fonctionnalité des systèmes plafonds/planchers en CLT, influence la quantité de matériaux utilisés dans la construction de chaque bâtiment. En effet pour les composants plafonds, escaliers, cloisons et enveloppe, le bâtiment en bois présente plus de matériaux que le bâtiment comparable en béton. Les principaux matériaux impliqués dans ces composantes sont l'acier, l'aluminium, le gypse et les isolants rigides en pente. Cette variation de quantité de matériaux d'un bâtiment à l'autre a donné lieu à différentes analyses de sensibilité. La réalisation d'analyses de sensibilité a mis en relief les effets des paramètres sensibles sur les résultats obtenus. Les résultats du profil environnemental des bâtiments variaient en fonction de la sensibilité analysée. L'attribution d'égale quantité de matériaux par composante aux deux bâtiments, augmente la quantité de matériaux dans le bâtiment en béton. Cette augmentation se traduisait en des augmentations relatives des impacts environnementaux du bâtiment en béton et par conséquent en des réductions relatives des impacts environnementaux du bâtiment en bois. La plus importante variation obtenue autour des résultats était dans le cas de l'analyse de sensibilité 1 pour le bâtiment en bois (variation de 13 %). En effet, cette analyse de sensibilité 1 visait à substituer le colombage en acier léger par le colombage en bois (2x4) dans le bâtiment en bois tandis que le comparable en béton ne subissait aucune modification. Cette substitution de matériau dans le colombage réduisait ainsi de 77 % la quantité d'acier utilisée dans le bâtiment en bois. L'utilisation de matériaux à faible empreinte carbone comme les produits de bois (d'ingénierie ou non) dans le bâtiment est une opportunité concrète additionnelle de réduction de l'empreinte carbone du bâtiment dans sa globalité.

Les matériaux utilisés dans la construction des bâtiments présentent des émissions intrinsèques (mesurées en équivalents CO<sub>2</sub>) différentes. Cependant il est important de souligner qu'une comparaison des émissions GES des matériaux sur une base de quantité (volume ou masse) est erronée, car ces matériaux ont des masses volumiques différentes. En effet, il serait plus approprié de faire une comparaison sur la base de la même unité fonctionnelle. Dans le cas des produits structuraux par exemple la portée (longueur ou hauteur en mètre) et la charge (kN/m) à supporter sont les deux paramètres à considérer pour une comparaison adéquate. En effet, l'analyse comparative des structures des deux bâtiments a indiqué que les émissions du bâtiment en bois représentent 1/3 des émissions du bâtiment en béton. Les faibles émissions GES des systèmes/éléments

construits en bois comparativement au béton corroborent les données publiées dans la littérature (Reid, et al. 2004, O'Connor et Sathre 2010, Gardet, Chretien et Martinez 2013).

Ceci étant dit, l'impact en matière d'émissions de GES de l'étape de production sur l'ensemble du cycle de vie est strictement lié aux émissions intrinsèques des différents matériaux utilisés. L'utilisation dans le bâtiment en béton d'une quantité (tonne) d'acier et de béton supérieure à celle utilisée dans le bâtiment en bois contribue fortement aux impacts environnementaux élevés de l'étape de production des matériaux du bâtiment en béton, comparé à ceux associés avec le bâtiment en bois (Tableau 29).

Tableau 29. Différence massique des matériaux utilisés dans les deux bâtiments

Matériaux	Masse totale (tonnes)		Différence (tonnes)
	Bâtiment bois	Bâtiment béton	
Bois	1 508	56	1 451
Béton	3 969	11 933	-7 964
Acier	954	1 245	-292
Aluminium	87	83	3
Brique	452	429	23
Isolant fibre synthétique	16	12	4
Gypse	959	692	267
Total	7 945	14 450	-6 506

Dans l'étude présente, les émissions de GES sont principalement attribuables aux étapes de production et d'opération des bâtiments. Les émissions liées à la production des matériaux et celles de la phase d'opération sont strictement liées aux sources d'énergie utilisées (Conseil canadien du bois 2017). Au Québec, en raison de l'utilisation prédominante de l'hydroélectricité (énergie à très faibles émissions de GES) en phase d'opération du bâtiment, les émissions de GES proviennent en majorité de l'étape de production des matériaux, comparativement à l'étape d'opération, ce qui n'est pas le cas dans d'autres provinces du Canada et ailleurs dans le monde. En effet, différentes études réalisées ailleurs dans le monde démontrent une inversion entre ces deux étapes du cycle de vie, en matière d'émissions de GES. Ceci est dû à l'utilisation en phase d'opération d'un bouquet énergétique contenant une importante proportion non renouvelable (charbon, huile, etc.) par rapport à la proportion renouvelable (Kumanayake et Luo 2018, Zhang et Wang 2017, Sharma, et al. 2011, Nawarathna, Fernando et Perera 2017).

L'énergie d'opération est au cœur des plus récents développements en matière d'efficacité et de performance énergétique (LEEDs, Zéro Carbone, Net-zéro, etc.). Dans le récent rapport titré « *Embodied Carbon of Buildings and Infrastructure* » publié dans « *International Policy Review* » en 2017, les auteurs prédisent que la réduction des émissions de carbone d'un bâtiment sera à plus de 80 %, centrée sur les émissions intrinsèques des matériaux (Figure 22). Dans cette lignée, le Québec a une marche d'avance sur le reste du Canada. Ce faisant, le Québec a l'opportunité de jeter les fondements de la prise en compte des émissions intrinsèques attribuables à la fabrication des matériaux de construction dans les politiques, normes et réglementation. Ces actions permettraient de maintenir et améliorer la position du Québec en tant que leader en matière environnementale.

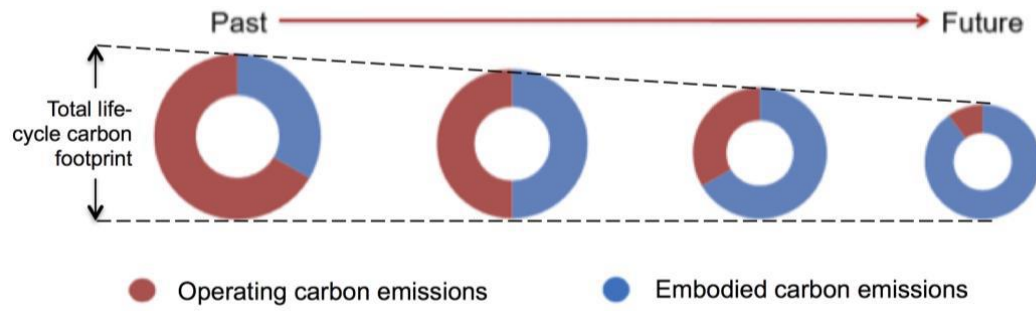


Figure 22. Projection des émissions de carbone dans le bâtiment du point de vue but et allocation (Zizzo, Kyriazis et Goodland 2017)

## 9. CONCLUSIONS

Cette étude avait pour objectif de réaliser une analyse du cycle de vie comparative de bâtiments de grande hauteur. À cet effet, différents scénarios ont été définis et analysés.

Les résultats de l'analyse du cycle de vie des bâtiments étudiés attribuent au bâtiment en bois un profil environnemental plus faible, comparativement à celui du bâtiment en béton. Ceci se vérifie pour toutes les cinq (5) catégories d'impacts analysées. Cependant, les différences relatives entre les profils environnementaux ne sont pas significatives à l'exception de la catégorie changement climatique. En effet, pour cette catégorie d'impact, les émissions de GES du bâtiment en bois sont 20 % plus basses par rapport aux émissions du bâtiment en béton. Cette différence représente des émissions évitées d'environ 1,8 kt équivalent CO<sub>2</sub> (soit 6,9 kt équivalent CO<sub>2</sub> pour le bâtiment en bois versus 8,7 kt équivalent CO<sub>2</sub> pour le bâtiment en béton). La production des matériaux est l'étape du cycle de vie des bâtiments qui émet le plus de GES représentant 65 % et 72 % des émissions totales du cycle de vie respectivement pour le bâtiment en bois et le bâtiment en béton. Ceci est notamment dû à la quantité de matériaux utilisés et aux émissions intrinsèques de chaque matériau de construction lors de sa production (voir Section 8, ci-haut).

Parmi les différents facteurs sensibles analysés en vue de diminuer l'empreinte carbone du bâtiment en bois, un seul facteur aboutit à une amélioration significative des émissions de GES de ce bâtiment (au-delà de 10 % par rapport au scénario de référence). Il s'agit du remplacement dans le bâtiment en bois du colombage en acier léger par le colombage en bois (2x4) dans l'analyse de sensibilité #1. Cette analyse de sensibilité montre les effets sur les résultats obtenus. En effet, une variation de 13 % des émissions de GES du bâtiment en bois comparativement au bâtiment en béton avait été observée. L'analyse de ces différents facteurs sensibles laisse entrevoir des marges de manœuvre possibles, dans le but de réduire l'empreinte carbone du bâtiment en bois. De ce fait, l'utilisation accrue du bois dans les bâtiments et l'écoconception sont des pistes concrètes qui méritent une attention particulière dans des travaux futurs.

## 10. RECOMMANDATIONS

Au regard des résultats obtenus et des conclusions faites, l'empreinte carbone du cycle de vie du bâtiment en bois est plus faible comparativement à celle du bâtiment en béton. L'analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie a présenté l'étape de production des matériaux comme étant la plus importante contributrice aux émissions totales de GES. Cette contribution relative aux émissions totales des GES dans chacun des bâtiments est au-delà de 60 %. En effet, ce résultat met en évidence l'impact de la production des matériaux dans les émissions totales GES du cycle de vie d'un bâtiment. De ce fait, il est important que le gouvernement du Québec adopte des politiques qui encouragent l'utilisation des énergies propres (énergie à faible empreinte carbone) au détriment de l'énergie fossile dans l'industrie manufacturière. Cependant, les incitatifs à l'utilisation des technologies propres (technologies à faible émission GES), dans cette industrie manufacturière sont aussi un enjeu clé dans la réduction des émissions de GES de la production des matériaux de construction tout comme les politiques qui encouragent l'utilisation de matières recyclées dans les différents processus de fabrication de nouveaux produits. De fait, ce dernier point permettrait de réduire les émissions associées au module A1 (extraction de la ressource) de l'étape de production des matériaux.

De plus, le gouvernement du Québec pourrait mettre sur pied des politiques qui visent l'instruction des entreprises manufacturières à la culture de la déclaration environnementale des produits (EPD) fabriqués et

l'inclure dans les accords d'échange avec des partenaires d'affaires étrangers dans le but d'accroître la production et la consommation locale. En fin, le politique pourrait :

- Faciliter l'utilisation des produits ou matériaux à faible empreinte carbone (tels que le bois), dans la construction des bâtiments par l'entremise de formation et de mise en évidence des utilisations potentielles du bois permises pas le code du bâtiment dans les bâtiments de grande hauteur
- Développer de produits et systèmes de construction permettant de réduire la demande énergétique / l'intensité carbonique dans la fabrication des matériaux et si applicable dans l'opération des bâtiments.

## 11. LIMITES DE L'ÉTUDE

La réalisation d'une étude comparative en analyse du cycle de vie (ACV) environnemental est une démarche complexe. Les hypothèses posées, le temps alloué à l'étude et à la collecte des données et leur disponibilité constituent des limites d'ordre pratique et d'ordre conceptuel. Dans le cadre de l'étude comparative des deux bâtiments (bois versus béton), le bâtiment en béton a été conçu au meilleur des connaissances des professionnels. Les quantités estimées de matériaux de construction du bâtiment en béton sont ainsi sujettes à un certain niveau d'incertitude pouvant avoir un impact sur les résultats obtenus.

Le béton est un matériau de construction qui en fin de vie absorbe le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Cette capacité d'absorption est le résultat de la réaction chimique entre les composantes du ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique (carbonatation). L'estimation des quantités de CO<sub>2</sub> absorbées est strictement fonction de l'aire (A) exposée à l'air des particules de béton. La grande incertitude autour de l'estimation de ce paramètre a été à l'origine de l'exclusion de la carbonatation du béton de l'étude. Cependant l'exclusion de l'étude de la capture, séquestration et stockage du carbone biogénique du bois permet renseigne sur la cohérence et la consistance du modèle, car dans les deux cas, les enjeux autour du carbone biogénique ont été exclus de l'analyse. Toutefois, leur prise en compte dans le modèle demeure pertinente.

La difficulté à contacter les différents intervenants sur le chantier, dans le but de collecter les données d'approvisionnement des matériaux de construction, a mené à l'exclusion de différents maillons dans la chaîne d'approvisionnement (grossistes et détaillants). Cette limite pratique affecte les distances de transport considérées et analysées. À ce titre, il est important de mentionner que la collecte de ces informations aurait donné de la précision aux inventaires du module (A4), mais aurait été sans effet significatif sur les résultats de l'analyse, car l'empreinte carbone du module transport est négligeable comparativement à celle du cycle de vie complet du bâtiment.

Du point de vue énergie d'opération, l'estimation de la consommation énergétique a été basée sur les données disponibles dans la littérature. Cependant, une modélisation énergétique des bâtiments analysés aurait permis de mieux cerner les différences en matière d'efficacité énergétique. Cet effort supplémentaire aurait apporté de la précision aux données analysées. Toutefois, les effets sur les résultats de l'étude seraient probablement marginaux, car le bâtiment de référence tel que conçu vise la plus haute reconnaissance du système d'évaluation LEED (certification LEED Platine).

La validation des résultats obtenus avec la méthode TRACI a été effectuée avec les catégories intermédiaires de la méthode Impacts 2002+. Cependant, une analyse plus conséquente aurait pu être menée jusqu'aux catégories de dommage dans le but de mettre en évidence les effets du regroupement des catégories d'impacts intermédiaires.



## 12. RÉFÉRENCES

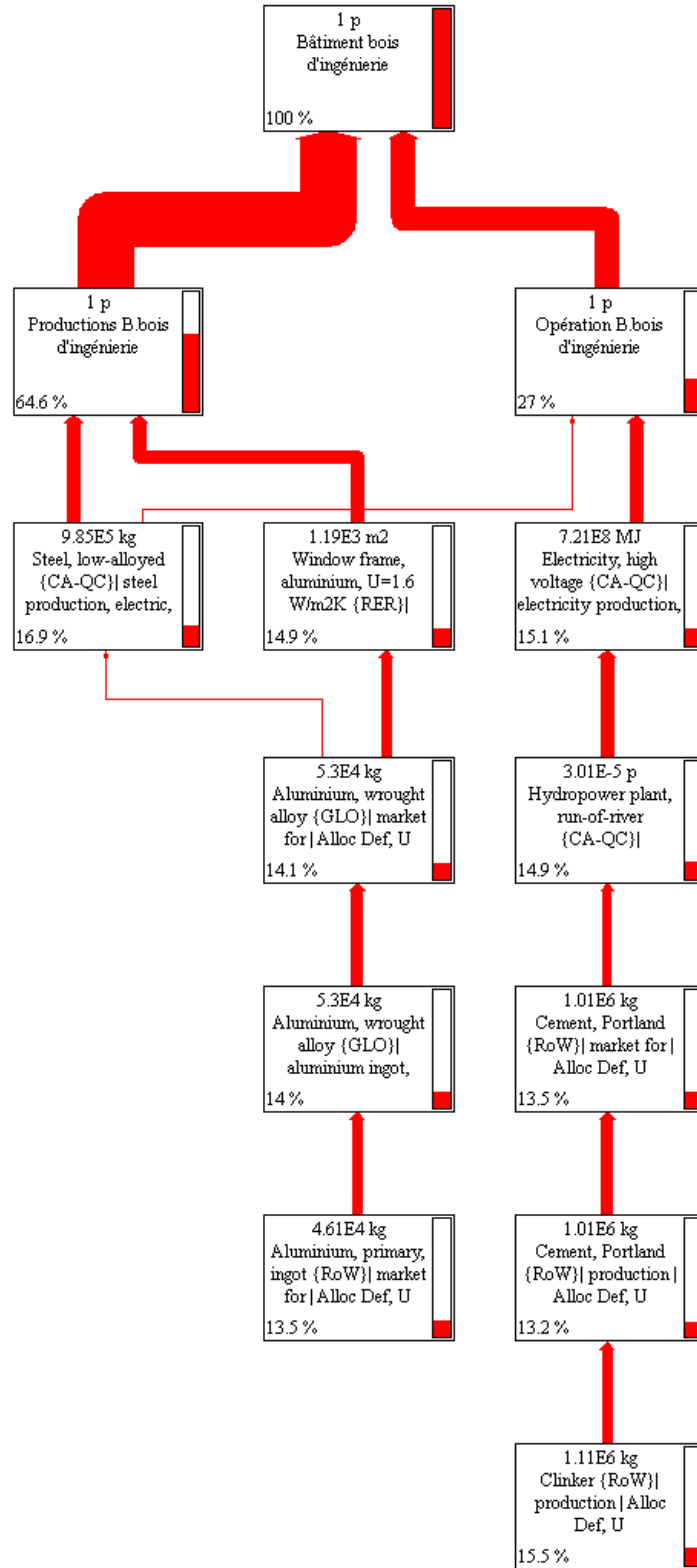
1. Athena Sustainable Materials Institute. (2012a). A lifecycle assessment of cross-laminated timber produced at Nordic Engineered Wood Products. Ottawa, ON.
2. Athena Sustainable Materials Institute. (2012b). A lifecycle assessment of glulam produced at Nordic.
3. Athena Sustainable Materials Institute (2013). A life cycle assessment of Cross-Laminated timber produced in Canada. Institute Ottawa, ON. <http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2013/10/CtoG-LCA-Canadian-CLT.pdf>
4. Athena Sustainable Materials Institute (2013). Life cycle assessment of MBMA primary and secondary structural steel and wall and roof panel production. Institute Ottawa, ON. <http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2016/09/MBMA-Final-Report-April-2013-with-addenda.pdf>
5. Athena Sustainable Materials Institute (2016). A cradle – to – gate life assessment of ready-mixed concrete manufactured by CRMCA members. Institute Ottawa, ON. <http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2017/06/CRMCA-LCA-Project-Report-20161201.pdf>
6. Athena Sustainable Materials Institute. (2017). Design building University of Massachusetts, Amherst. An environmental building declaration according to EN 15978 standard. P 1-52
7. Athena Sustainable Materials Institute. (2002a). Maintenance, repair and replacement effects for building envelope materials.
8. Athena Sustainable Materials Institute. (2002b). Cradle – to – gate life cycle inventory: Canadian and US steel production by mill type, March 2002.
9. Athena Sustainable Materials Institute. (1997). Demolition energy analysis of office building structural systems. Ottawa-Canada, March 1997
10. Bare, J. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other Environmental impacts 2.0. Clean Technologies and Environmental Policy, 13(5), 687–696.doi :10.1007/s10098-010-0338-9
11. Baumann, H. and Tillman, A.-M. (2004). The Hitch Hicker’s Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. Suède, Student litterature, 543 p.
12. CECOBOIS (n.d.). L’avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques. <https://cecobois.com/publications-documents/CECO-784-Fiche-avantage-enviro-WEB.pdf> , consulté le 10-12-2017
13. Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. The International Journal of Life Cycle Assessment, 15(6), 549–556. DOI :10.1007/s11367-010-0191-4
14. Conseil canadien du bois. (2017). <http://cwc.ca/wp-content/uploads/2017/02/Carbon-Fact-Sheet-February-7-2017.pdf> , consulté le 03-21-2019.
15. Conseil National de Recherches du Canada. (2011). National Building Code of Canada: Volume 2.
16. Durlinger, D., Crossin, E., Wong, J. (2013). Life cycle assessment of a cross-laminated timber building. Pp : 112. ISBN : 978-1-921763-63-2
17. EN 15978 (2011). Sustainability of construction work – assessment of environmental performance of buildings – calculation method.

18. EN 15804 (2012). Sustainability of construction work – environmental product declaration – core rules for the product category of construction products.
19. Gardet, S., Chrétien, M., Martinez, C. (2013). Expérimentation et valorisation de l'utilisation de bois locaux comme solution de fondation et de renforcement des sols. 21<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Bordeaux-France 26-30 août 2013.
20. Gouvernement du Québec. (2014). Le guide sylvicole du Québec : Outil de comparaison des essences. <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/index.php>, Consulté en Janvier 2019.
21. Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., van Oers, L., Sleswijk, A. W., Suh, S., Udo de Haes, H. A., de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M. A. J., Lindijer, E., Roorda, A. A. H., van der Ven, B. L. and Weidema, B. P. (2002). Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Pays-Bas, Kluwer Academic Publishers, Centre of Environmental Sciences, Leiden University, 692 p.
22. Grann, B., (2013). A comparative life cycle assessment of two multistory residential building: Cross-laminated timber vs concrete slab and column with gauge steel walls. FPInnovations report. Engineered Wood Products. Ottawa, ON.
23. Groupe AGECO. (2018). « Étude sur les avantages de la préfabrication, Rapport préliminaire ».
24. Gustafsson, L., Borjesson, P. (2007). Life cycle assessment in green chemistry. A comparison of various industrial wood surface coatings. Int. J. LCA 12 (3), 151-159.
25. Hauschild, M. Z., Goedkoop, M., Guinée, J.B., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., Margni, M. and De Schryver A. (2009b). Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. International Reference.
26. ISO 14044. (2006). Environmental management – life cycle assessment – requirements and guidelines.
27. ISO 15686-5. (2008). Building and constructed assets – Service-life planning
28. ISO 21930. (2007). Building and construction assets - Sustainability in building constructions - Environmental declaration of building products.
29. ISO 14040. (2006). Environmental management – life cycle assessment – principles and framework.
30. Ivan, L. P., (2013). Life cycle assessment overview and application: Comparison of structural frame alternatives for office buildings. Theses and dissertations, Ryerson University.
31. Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P. and Shaked, S. (2010). Analyse de cycle de vie – Comprendre et réaliser un écobilan. 2<sup>e</sup> édition mise à jour et augmentée. pp. 289.
32. Kumanayake, Ramya, et Hanbin Luo. (2018). «Life cycle carbon emission assessment of a multi-purpose university building: A case study of Sri Lanka» Front. Eng. Manag 14.
33. Lagerblad, B. (2005). Carbon dioxide uptake during concrete life cycle: State of the art. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute.
34. Lenzen, M. (2000). Errors in Conventional and Input-Output—based Life—Cycle Inventories. Journal of Industrial Ecology, 4(4), 127–148.
35. Life Cycle Data System (ILCD). (2018). Handbook Background document. In Life Cycle Thinking and Assessment. Institute for the Environment and Sustainability. Site de la Commission européenne - Joint Research Center, [En ligne]. <http://ict.jrc.ec.europa.eu/assessment/assessment/projects#d> (Page consultée le 13 mars 2018).

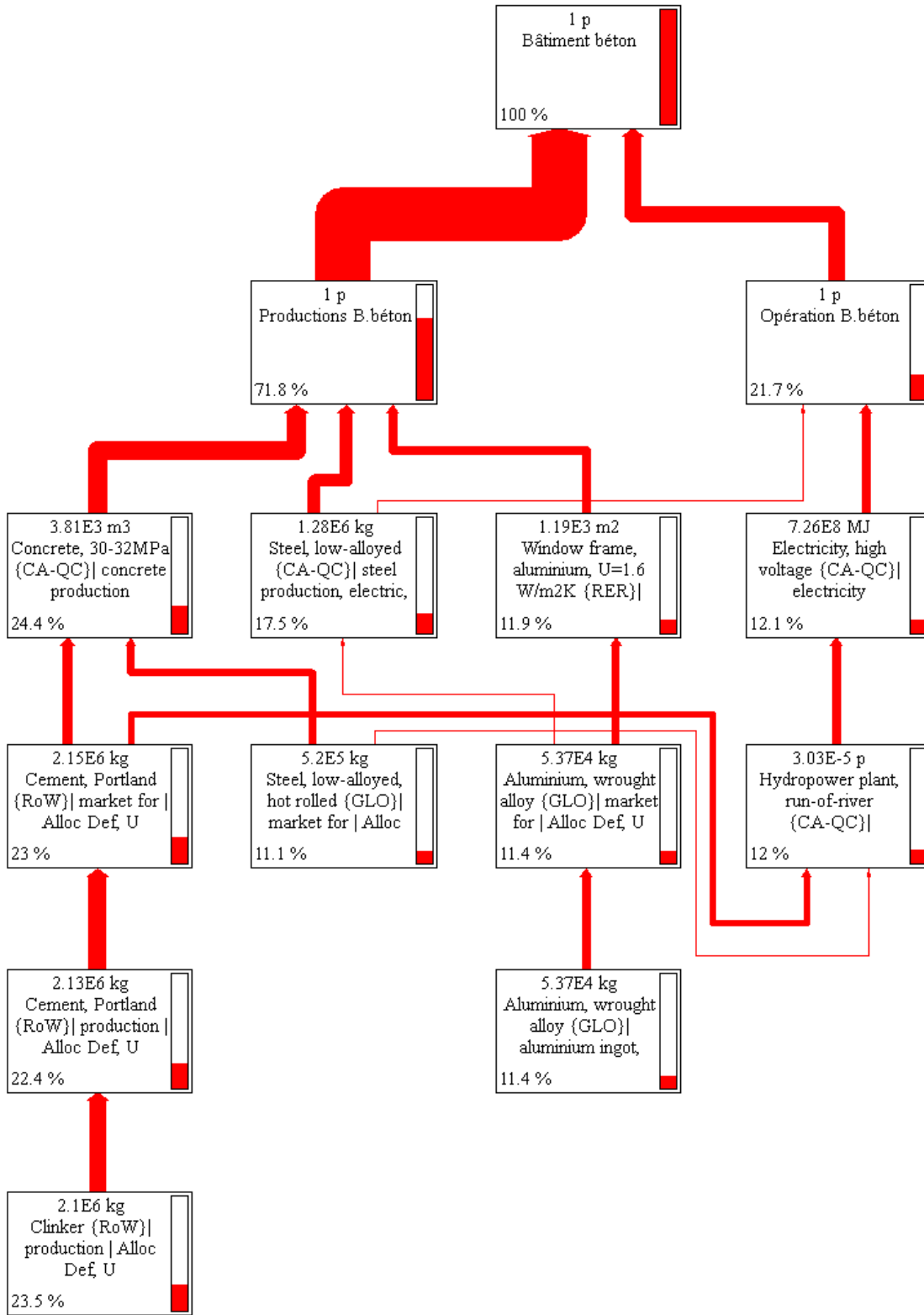
36. Life Cycle Data System (ILCD). (2010). Review schemes for life cycle assessment. International Reference Life Cycle Data System. Handbook. DOI : 10.2788/39791
37. Life Cycle Data System (ILCD). (2012). Towards more sustainable production and consumption for a resource-efficient Europe. International Reference Life Cycle Data System. Handbook. DOI : 10.2788/85727
38. Marion Ferrand, Vincent Manneville, Sindy Moreau, Elise Lorinquer, Thierry Charroin, Alicia Charpiot, Armelle Gac, Carlos Lopez, François Brun (2012). Estimation de l'incertitude dans les analyses de cycle de vie en élevage : apport de l'analyse de sensibilité, limites du modèle. 12th European Symposium on statistical methods for the Food industry.
39. McGill.ca. Quelle quantité d'eau consommons-nous?  
<https://www.mcgill.ca/waterislife/fr/l%E2%80%99eau-%C3%A0-la-maison/notre-consommation> , consultée en septembre 2018.
40. Nawarathna, Amalka, Gayani Nirodha Fernando, et Srinath Perera. (2017). «Estimating whole life cycle carbon emissions of buildings: a literature review» the 6<sup>th</sup> World Construction Symposium 2017: What's new and what's next in the built environment sustainability agenda? Sri Lanka, 10.
41. Norris, G. A. (2003). Impact Characterization in the Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. Methods for Acidification, Eutrophication, and Ozone Formation. Journal of Industrial Ecology, vol. 6, n° 3-4, p. 79-101.
42. O'Connor, J. (2004) Survey on actual service lives for North American buildings. Report presented at Woodframe housing durability and disaster issues conference, Las Vegas, October 2004.
43. O'Connor, J., Podesto, L., Barry, A., and Grann, B. (2013). Chapter 11 - Environmental performance of cross-laminated timber. In CLT Handbook (U.S.). Pointe-Claire, QC : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Binational Softwood Lumber Council.
44. O'Connor, Jennifer et Roger Sathre. (2010). A synthesis of research on wood products and greenhouse gas impacts. Technical report N°. TR-19R, Vancouver : FPInnovations.
45. PRe Consultants. (n.d.). SimaPro 8. Retrieved from <http://www.pre-sustainability.com>
46. Recyc-Québec (2015). Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec. Publié en 2017, p. 39.
47. Reid, Hannah, et al. (2004) «Using wood products to mitigate climate change: A review of evidence and key issues for sustainable development». Collaboration between the Climate Change Programme, the Environmental Economics Programme and the Forestry and Land Use Programme at the International Institute for Environment and Development (IIED), and the Edinburgh Centre for Carbon Management (ECCM), United Kingdom, 91.
48. Ressources Naturelles Canada. (2015). Base de données nationale sur la consommation d'énergie. Consulté en février 2018.  
<http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/showTable.cfm?type=CP&sector=res&juris=qc&rn=1&page=5>
49. Robertson, A., Lam, F. C. F., & Cole, R. J. (2012). A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Mid-Rise Office Building Construction Alternatives: Laminated Timber or Reinforced Concrete. Buildings, 2(3), 245–270. DOI :10.3390/buildings2030245.
50. RSMMeans. (2017). Building construction cost data. 75<sup>ième</sup> Édition annuelle Item#60017. pp 925.
51. Sharma, Aashish, Abhishek Saxena, Muneesh Sethi, Venu Shree, et Varun. (2011). «Life cycle assessment of buildings: A review» Renewable and sustainable energy reviews, 5.

52. Sotramont. (2017). Arbora : condos de huit étages en bois lamellé-croisé.  
<https://maisonsaine.ca/construction-verte/arbora-condos-de-huit-etages-en-bois-lamelle-croise.html> ,  
consulté le 13-12-2017.
53. Tufvesson, L., Borjesson, P. (2008). Wax production from renewable feedstock using biocatalysts instead of using fossil feedstock and conventional methods. *Int. J. LCA* 13, 328-338.
54. Weidema B. P., Wesnaes M.S. (1996). Data quality management for life cycle inventories: an example to using data quality indicator. *J Cleaner Prod.* 4 (3-4) : pp. 167-174.
55. Wastiels, L., Delem, L., and Dessel, J.V. (2013). To module D or not to module D? The relevance and difficulties of considering the recycling potential in building LCA. Conference paper.
56. World Steel Association. (2011). Methodology report: Life cycle inventory study for steel products. pp 95.
57. Zhang, Xiaocun, et Fenglai Wang. (2017). «Analysis of embodied carbon in the building life cycle considering the temporal perspectives of emissions: A case study in China» *Energy and buildings*, 10.
58. Zizzo, Ryan, Joanna Kyriazis, et Helen Goodland. (2017). «Embodied carbon of buildings and infrastructure: international policy review» Review, British Columbia.

**ANNEXE I –  
ARBRE DE PROCESSUS DU BÂTIMENT EN BOIS  
ET ÉMISSION DES GES**



**ANNEXE II –  
ARBRE DE PROCESSUS DU BÂTIMENT EN BÉTON  
ET ÉMISSION DES GES**





**ANNEXE III –  
INVENTAIRE ET PROCESSUS DE MODÉLISATION DES  
BÂTIMENTS ANALYSÉS**

Bâtiment au complet							
Étapes de cycle de vie							
Production							
Matériaux	Proxies	Quantité		Unité	Base de données	Localisation géographique	Années
		Scénario 1	Scénario 2				
Gravier	Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	74,6	74,6	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2014
Poussière de pierre	Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U	22,4	22,4	ton	Écoinvent v3.3	Suisse	2016
Béton structural	Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	483	3 808	m3	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Béton maigre	Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U	1 651,2	1 362,6	m3	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
Béton léger	Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	501,6	491,6	ton	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
Brique	Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U	451,9	428,6	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Aluminium	Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U	73,5	68,3	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Contreplaqué	Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	7,7	ton	USLCI	US	2000
Acier	Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	955	1 245	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Isolant polyuréthane	Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U	5,7	6,4	ton	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
Laine de verre	Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2,5	2,5	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
XPS	Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U	8,8	4,3	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Laine de roche	Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U	10,4	10,4	ton	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
Scellant asphalte	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	286	20,9	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
PET	PET film (production only) E	20,9	286	kg	Écoinvent v3.3	Europe	2016
Gypse 16 mm	Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	1 445,4	1 361	m <sup>2</sup>	USLCI	A. du Nord	2010
Gypse 13 mm	Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	26 282,22	14 155,5	m <sup>2</sup>	USLCI	A. du Nord	2010
OSB	Oriented strand board {CA-QC}  production   Alloc Def, U	41,1	39	m <sup>3</sup>	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2006
Double vitre	Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	4 290,6	4 290,6	m <sup>2</sup>	Écoinvent v3.3	Europe	2016
Vitre simple	Flat glass, coated {RER}	3,8	3,8	kg	Écoinvent v3.3	Europe	2016

	production   Alloc Def, U						
Porte interne	Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	3 943,7	3 943,7	m2	Écoinvent v3.3	Europe	2016
Stucco	Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U	443,9	443,9	ton	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
Bois d'œuvre	Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	1502	1502	kg	Écoinvent v3.3	Europe	2016
Cadre fenêtre	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {RER}  production   Alloc Def, U	1 189	1 189	m2	Écoinvent v3.3	Europe	2016
Colonne	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	171,6	0	m3	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
CLT	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2 047	0	m3	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
Poutre	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	378,2	0	m3	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
<b>Construction</b>							
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	2 092	1 949,3	ktkm	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	22 464	44 928	kWh	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	816,9	1 634	GJ	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
	Heat, central or small-scale, natural gas {CH}  heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW   Alloc Def, U	0	13	GJ	Écoinvent v3.3	Europe	2016
<b>Opération</b>							
	Silicon, multi-Si, casted {CA-QC}  production   Alloc Def, U	3,7	3,7	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Cement mortar {RoW}  production   Alloc Def, U	118	118	kg	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
	Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	3	3	kg	USLCI	A. du Nord	2016
	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	207,9	207,9	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	7,7	ton	USLCI	US	2000
	Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	91,4	91,4	ton	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
	Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	30,2	30,2	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Tap water {CA-QC}  tap water	1 657,5	1 657,5	kton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016

	production, conventional treatment   Alloc Def, U						
	Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	42,9	42,9	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Rec, U	12,9	12,9	ton	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	198 422 920	199 778 607	kWh	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	<b>Fin de vie</b>						
	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	37,2	38,1	GJ	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
	Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	2 966,2	1 488	GJ	Écoinvent v3.3	Mondial	2016
	Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	105	168,7	ktkm	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	3 987	11 620	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	955	1 217	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste brick {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	452	416	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste mineral wool {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	15	14	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste gypsum plasterboard {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Rec, U.	959	758	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U	1 508	24	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste glass sheet {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U.	55	55	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	854 722	835 278	kWh	Écoinvent v3.3	Québec, CA	2016
	Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	127,6	359	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste polyurethane {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	2	1,2	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste plastic plaster, for final disposal {CH}  treatment of waste plastic plaster, inert material landfill   Alloc Def, U	22	23,8	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016
	Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27	15	0,6	ton	Écoinvent v3.3	Europe	2016

**ANNEXE IV –  
INVENTAIRE ET PROCESSUS DE MODÉLISATION DES  
STRUCTURES DES BÂTIMENTS ANALYSÉS**

<b>Production</b>			
	<b>Quantité</b>		
<b>Proxies</b>	<b>Scénario 1</b>	<b>Scénario 2</b>	<b>Unité</b>
Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	75	75	tonne
Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U	22	22	tonne
Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	483	3 808	m <sup>3</sup>
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	52	442	tonne
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	172	0	m <sup>3</sup>
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2 047	0	m <sup>3</sup>
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	382	0	m <sup>3</sup>
<b>Construction</b>			
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	952	652	ktkm
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	24 722	24 722	kWh
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	62	122	GJ
Heat, central or small-scale, natural gas {CH}  natural gas, burned in micro gas turbine, 100kWe   Alloc Def, U	0	13	GJ
<b>Fin de vie</b>			
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	42	41	GJ
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	29	111	ktkm
Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U	1 250	0	tonne
Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	1 123	9 294	tonne
Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U.	52	442	tonne
Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	34	270	tonne
Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27	13	0	tonne

## **ANNEXE V – REGROUPEMENT DES MATÉRIAUX**

Matériaux	Proxies
Gravier	Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U
Poussière de pierre	Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U
Béton structural	Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U
Béton maigre	Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U
Béton léger	Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U
Brique	Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U
Aluminium	Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U
Contreplaqué	Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US
Acier	Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U
Isolant polyuréthane	Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U
Laine de verre	Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U
XPS	Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U
Laine de roche	Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U
Scellant asphalte	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U
PET	PET film (production only) E
Gypse 16 mm	Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m <sup>2</sup> /RNA
Gypse 13 mm	Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m <sup>2</sup> /RNA
OSB	Oriented strand board {CA-QC}  production   Alloc Def, U
Double vitre	Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U
Vitre simple	Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U
Porte interne	Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U
Stucco	Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U
Bois d'œuvre	Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S
Cadre fenêtre	Window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U
Colonne	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U
CLT	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U
Poutre	Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U



**ANNEXE VI –  
INVENTAIRE SENSIBILITÉ 1 : REMPLACEMENT DU COLOMBAGE  
EN ACIER LÉGER PAR LE COLOMBAGE EN BOIS D'ŒUVRE (2\*4)**

<b>Production</b>		
Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	74,6	ton
Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U	22,4	ton
Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	483	m3
Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U	1651,2	m3
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	501,6	ton
Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U	451,9	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U	73,5	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	219,5	ton
Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U	5,7	ton
Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2,5	ton
Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U	8,853	ton
Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U	10,4	ton
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	285,9	ton
PET film (production only) E	20,9	kg
Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	1 445,4	m <sup>2</sup>
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	26 282,2	m <sup>2</sup>
Oriented strand board {CA-QC}  production   Alloc Def, U	41,1	m <sup>3</sup>
Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	4 290,6	m <sup>2</sup>
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	3,77	kg
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	1 129,6	m <sup>2</sup>
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	2 814,1	m <sup>2</sup>
Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U	443,9	ton
Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	105,6	ton
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	171,6	m <sup>3</sup>
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2 047	m <sup>3</sup>
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC}  production   Alloc Def, U	378,2	m <sup>3</sup>
Window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	1 189	m <sup>2</sup>
<b>Construction</b>		
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	2097,1	ktkm
Electricity, medium voltage {CA-QC}  market for   Alloc Def, U	80,9	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	816,9	GJ

<b>Opération</b>		
Silicon, multi-Si, casted {CA-QC}  production   Alloc Def, U	3,7	ton
Cement mortar {RoW}  production   Alloc Def, U	118	kg
Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	3	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	207,9	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	91,4	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	30,2	ton
Tap water {CA-QC}  tap water production, conventional treatment   Alloc Def, U	1 657,5	kton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Rec, U	12,9	ton
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	42,9	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	198 422 920	kWh
<b>Fin de vie</b>		
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	37,2	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	2 726,24	GJ
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	81,1	ktkm
Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	3 969	ton
Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	219,5	ton
Waste brick {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	452	ton
Waste mineral wool {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U.	15	ton
Waste gypsum plasterboard {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	959	ton
Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U.	1 612,1	ton
Waste glass sheet {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	55	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	3 077	GJ
Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	127,6	ton
Waste polyurethane {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	2	ton
Waste plastic plaster, for final disposal {CH}  treatment of waste plastic plaster, inert material landfill   Alloc Def, U	22	ton
Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27	16	ton

**ANNEXE VII –  
INVENTAIRE SENSIBILITÉ 2 : ÉGALE QUANTITÉ DE MATÉRIAUX  
DANS LES PLAFONDS DU BÂTIMENT EN BÉTON  
COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN BOIS**

<b>Production</b>		
Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	74,6	ton
Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U	22,4	ton
Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	3 808	m3
Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U	1 362,6	m3
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	491,6	ton
Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U	428,6	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U	70,96	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	1 286,5	ton
Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U	6,4	ton
Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2,5	ton
Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U	4,3	ton
Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U	10,4	ton
PET film (production only) E	20,9	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	285,9	ton
Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m2/RNA	3 070,7	m2
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m2/RNA	23 823	m2
Glazing, double, U<1.1 W/m2K {RER}  production   Alloc Def, U	39	m2
Glazing, double, U<1.1 W/m2K {RER}  production   Alloc Def, U	4 290,6	m2
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	3,8	kg
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	2 814,1	m2
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	1 129,6	m2
Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U	443,9	ton
Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	1 502	kg
Window frame, aluminium, U=1.6 W/m2K {RER}  production   Alloc Def, U	1 189	m2
<b>Construction</b>		
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	1 989,6	ktkm
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	161,7	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1 634	GJ
Heat, central or small-scale, natural gas {CH}  heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW   Alloc Def, U	13	GJ
<b>Opération</b>		

Silicon, multi-Si, casted {CA-QC}  production   Alloc Def, U	3,7	ton
Cement mortar {RoW}  production   Alloc Def, U	118	kg
Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	3	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	207,9	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	91,4	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	30,2	ton
Tap water {CA-QC}  tap water production, conventional treatment   Alloc Def, U	1657,5	kton
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	42,9	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Rec, U	12,9	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	199 778 607	kWh
<b>Fin de vie</b>		
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	38,067	GJ
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	171,1	ktkm
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1 510,9	GJ
Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U	24	ton
Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	11 620	ton
Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	1 259	ton
Waste brick {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	416	ton
Waste mineral wool {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	14	ton
Waste gypsum plasterboard {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Rec, U	909,5	ton
Waste glass sheet {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	55	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	842 222	kWh
Waste polyurethane {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	1,2	ton
Waste plastic plaster, for final disposal {CH}  treatment of waste plastic plaster, inert material landfill   Alloc Rec, U	23,8	ton
Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	359	ton
Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27	573	kg

**ANNEXE VIII –  
INVENTAIRE SENSIBILITÉ 3 : ÉGALE QUANTITÉ DE MATÉRIAUX  
DANS LES PLAFONDS, ENVELOPPE, CLOISONS ET ESCALIERS DU  
BÂTIMENT EN BÉTON COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN  
BOIS**

<b>Production</b>		
Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	74,6	ton
Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U	22,4	ton
Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	4 200	m3
Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U	1657	m3
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	501,6	ton
Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U	452	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U	73,5	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	1 308	ton
Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U	6,4	ton
Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2,5	ton
Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U	7,7	ton
Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U	10,4	ton
PET film (production only) E	20,9	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	285,8	ton
Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	3 070,7	m <sup>2</sup>
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	24 656	m <sup>2</sup>
Oriented strand board {CA-QC}  production   Alloc Def, U	40,1	m <sup>3</sup>
Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	4 290,6	m <sup>2</sup>
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	2 814,1	m <sup>2</sup>
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	3,8	kg
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	1129,6	m <sup>2</sup>
Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U	443,9	ton
Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	1 502	kg
Window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	1 189	m <sup>2</sup>
<b>Construction</b>		
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	1 974	ktkm
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	161,7	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1 634	GJ
Heat, central or small-scale, natural gas {CH}  heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW   Alloc Def, U	13	GJ



<b>Opération</b>		
Silicon, multi-Si, casted {CA-QC}  production   Alloc Def, U	3,7	ton
Cement mortat {RoW}  production   Alloc Def, U	118	kg
Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	3	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	207,9	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	91,4	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	30,2	ton
Tap water {CA-QC}  tap water production, conventional treatment   Alloc Def, U	1 657,5	kton
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	42,9	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Rec, U	12,9	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	199 778 607	kWh
<b>Fin de vie</b>		
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	38,1	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1 541	GJ
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	173,5	ktkm
Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U.	24	ton
Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	12 550	ton
Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	1 295	ton
Waste brick {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	452	ton
Waste mineral wool {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	14	ton
Waste gypsum plasterboard {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Rec, U	959	ton
Waste glass sheet {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	55	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	851 389	kWh
Waste polyurethane {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	1,2	ton
Waste plastic plaster, for final disposal {CH}  treatment of waste plastic plaster, inert material landfill   Alloc Rec, U	23,8	ton
Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	359	ton
Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27 S	573	kg

**ANNEXE IX –  
INVENTAIRE SENSIBILITÉ 4 : AJOUT DE 25 % DE VOLUME DE  
BÉTON ET D'ACIER DANS LE BÂTIMENT EN BÉTON  
COMPARATIVEMENT AU BÂTIMENT EN BOIS**

<b>Production</b>		
Gravel, crushed {CA-QC}  production   Alloc Def, U	74,6	ton
Stone meal {CH}  production   Alloc Def, U_Arb. C_Bois	22,4	ton
Concrete, 30-32MPa {CA-QC}  concrete production 30-32MPa, RNA only   Alloc Def, U	4 761	m3
Lean concrete {RoW}  production, with cement CEM II/A   Alloc Def, U	1 362,6	m3
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	491,6	ton
Shale brick {CA-QC}  production   Alloc Def, U	428,6	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Def, U	68,34	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	1 355,1	ton
Polyurethane, rigid foam {RoW}  production   Alloc Def, U	6,4	ton
Glass wool mat {CA-QC}  production   Alloc Def, U	2,5	ton
Polystyrene, extruded {CA-QC}  polystyrene production, extruded, CO <sub>2</sub> blown   Alloc Def, U	4,3	ton
Stone wool, packed {RoW}  stone wool production, packed   Alloc Def, U	10,4	ton
PET film (production only) E_Arb.C_Bois	20,89	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	285,95	ton
Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	3 070,7	m <sup>2</sup>
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m <sup>2</sup> /RNA	12 455,8	m <sup>2</sup>
Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	39	m <sup>2</sup>
Glazing, double, U<1.1 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	4 290,6	m <sup>2</sup>
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	3,77	kg
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	2 814,1	m <sup>2</sup>
Door, inner, wood {RER}  production   Alloc Def, U	1 129,6	m <sup>2</sup>
Stucco {RoW}  production   Alloc Def, U	443,9	ton
Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	1 502	kg
Window frame, aluminium, U=1.6 W/m <sup>2</sup> K {RER}  production   Alloc Def, U	1 189	m <sup>2</sup>
<b>Construction</b>		
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	2 112,5	ktkm
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	161,7	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1 634	GJ
Heat, central or small-scale, natural gas {CH}  heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW   Alloc Def, U	15,2	GJ

<b>Opération</b>		
Silicon, multi-Si, casted {CA-QC}  production   Alloc Def, U	3,7	ton
Cement mortat {RoW}  production   Alloc Def, U	118	kg
Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	3	kg
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC}  production   Alloc Def, U	207,9	ton
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	7,7	ton
Lightweight concrete block, expanded clay {RoW}  production   Alloc Def, U	91,4	ton
Steel, low-alloyed {CA-QC}  steel production, electric, low-alloyed   Alloc Def, U	30,2	ton
Tap water {CA-QC}  tap water production, conventional treatment   Alloc Def, U	1 657,5	kton
Flat glass, coated {RER}  production   Alloc Def, U	42,9	ton
Aluminium alloy, ALi {CA-QC}  production   Alloc Rec, U	12,9	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	199 778 607	kWh
<b>Fin de vie</b>		
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	38,1	GJ
Diesel, burned in agricultural machinery {GLO}  market for diesel, burned in agricultural machinery   Alloc Def, U	1736,6	GJ
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5   Alloc Def, U	196,2	ktkm
Waste wood, post-consumer {CH}  treatment of, sorting and shredding   Alloc Def, U	24	ton
Waste reinforced concrete {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	13 833	ton
Waste reinforcement steel {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	1 327,1	ton
Waste brick {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	416	ton
Waste mineral wool {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U	14	ton
Waste gypsum plasterboard {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Rec, U	758	ton
Waste glass sheet {CH}  treatment of, sorting plant   Alloc Def, U.	55	ton
Electricity, high voltage {CA-QC}  electricity production, hydro, run-of-river   Alloc Def, U	835 278	kWh
Waste plastic plaster, for final disposal {CH}  treatment of waste plastic plaster, inert material landfill   Alloc Def, U	23,8	ton
Waste polyurethane {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	1,2	ton
Waste concrete {CH}  treatment of, inert material landfill   Alloc Def, U	423,2	ton
Waste incineration of untreated wood (10.7% water content), EU-27 S	573	kg

**ANNEXE X –  
RAPPORT FINAL DE REVUE CRITIQUE  
GROUPE AGÉCO**



## RAPPORT FINAL DE REVUE CRITIQUE

**ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) ENVIRONNEMENTALE  
COMPARATIVE DE LA CONSTRUCTION DE BÂTIMENTS DE  
GRANDE HAUTEUR EN BOIS MASSIF ET EN BÉTON**

PRÉSENTÉ À



1ER JUILLET 2019

---

### INFORMATIONS SUR LE RAPPORT

<b>Titre de l'étude</b>	Analyse de Cycle de Vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton
<b>Date</b>	1er juillet 2019
<b>Auteurs de l'étude</b>	Gatien Geraud Essoua Essoua et Patrick Lavoie, FPInnovations
<b>Réviseur indépendant</b>	François Charron Doucet, Groupe AGÉCO
<b>Mandataire de l'étude</b>	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP)

## 1. INTRODUCTION

---

Ce rapport de revue critique présente les conclusions ainsi que le verdict final de la revue critique du rapport intitulé *Analyse de Cycle de Vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*. Le rapport révisé, mandaté par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP), a été préparé par MM. Gatien Geraud Essoua Essoua et Patrick Lavoie de FPIInnovations.

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un programme de développement de connaissances sur les matériaux à faible empreinte environnementale. Elle vise à mettre à la disposition des acteurs du secteur de la construction, des informations sur l'empreinte carbone globale des systèmes de construction de bâtiments ayant une structure en bois d'ingénierie de grande hauteur et superficie. Le projet Arbora, qui est le plus haut bâtiment en bois de la ville de Montréal, est utilisé comme étude de cas pour comparer la construction actuelle (bâtiment en bois) avec un bâtiment équivalent en béton.

Étant donné que le MFFP désire communiquer à des tierces parties externes les résultats et conclusions de cette étude comparative, une revue critique avec un expert indépendant a été réalisée.



## 2. MÉTHODOLOGIE DE LA REVUE

---

L'objectif de la revue critique est de valider la conformité du rapport d'analyse du cycle de vie (ACV) avec les exigences des normes suivantes :

- ISO 14 040:2006 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie –Principes et cadre
- ISO 14 044:2006 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie –Exigences et lignes directrices

Les éléments principaux à valider durant le processus de revue critique selon les normes ISO 14 040-44:2006 sont les suivants :

- La méthodologie utilisée pour réaliser l'ACV doit être conforme à cette norme;
- La méthodologie utilisée pour réaliser l'ACV doit être scientifiquement et techniquement valide;
- Les données utilisées doivent être appropriées et représentatives de l'objectif et du champ de l'étude;
- L'interprétation doit refléter les limites identifiées et les objectifs de l'étude;
- Le rapport doit être transparent et cohérent.

Les conclusions de ce rapport de revue critique s'appliquent à la version finale du rapport reçu le 1er juillet 2019. Dans le cadre de cette revue, une révision du modèle n'a pas été effectuée; cependant la plausibilité des résultats a été évaluée.

La revue critique a été réalisée par un seul expert indépendant qui est M. François Charron-Doucet, directeur scientifique, Groupe AGÉCO. M. Charron-Doucet cumule plus de 12 ans d'expérience comme analyste et réviseur indépendant dans le domaine de l'ACV.

Il est important de noter que selon la section 6.1 de la norme ISO 14044 :2006, dans le cas d'une étude qui vise à supporter une affirmation comparative divulguée au public, une revue critique doit être réalisée par un comité composé d'au moins trois experts indépendants. Par conséquent, le processus de révision avec un seul expert ne permet pas de se conformer à cette exigence.

### Déroulement de la revue critique

Le processus de revue critique s'est déroulé du 4 janvier 2018 au 1er juillet 2019. Il s'est réalisé de façon concomitante avec l'exécution de l'étude. Dans un premier temps, les objectifs et le champ de l'étude ont été revus, suivis de l'analyse de l'inventaire et finalement le rapport complet.

La revue a été réalisée avec des échanges courriel et au besoin des appels ont été organisés avec les auteurs pour traiter des points les plus complexes.

Au total, quatre rondes de commentaires ont été réalisées avec les auteurs de l'étude (voir en annexe la liste complète des commentaires).

### 3. CONCLUSIONS ET VERDICT DE LA REVUE CRITIQUE

---

Le réviseur juge que les quatre phases de cette étude ACV (objectifs et champ de l'étude, inventaire, évaluation des impacts et interprétation) ont été exécutées de façon conforme avec les exigences des normes ISO 14 040-44 :2006.

Les méthodes et données utilisées sont considérées comme scientifiquement valides et représentatives de la pratique actuelle en ACV. Ces dernières sont également appropriées pour répondre aux objectifs de cette étude.

La présentation des résultats est axée sur la catégorie changement climatique, mais la robustesse des résultats pour les autres catégories a été prise en considération dans les analyses de sensibilité. L'interprétation est réalisée dans le respect des limites de l'étude.

Le rapport est très transparent : les choix de modélisation et les hypothèses sont documentés de façon complète et détaillée.

Cette étude apporte un éclairage additionnel sur la question de la performance environnementale de l'utilisation du bois dans un contexte de bâtiment de grande hauteur au Québec.

Ce rapport de revue critique ne représente pas un endossement par le réviseur indépendant des conclusions et des affirmations comparatives de cette étude. Il représente toutefois un avis quant à la conformité du rapport à l'étude avec les exigences des normes ISO 14 044-44 portant sur les déclarations comparatives.

#### Verdict

En excluant les exigences de la section 6.1 de la norme ISO 14 044 pour les affirmations comparatives, le réviseur indépendant juge que le rapport « *Évaluation des constructions à haute efficacité énergétique dans le contexte québécois – 1 juillet 2019* » est conforme à toutes les autres exigences des normes ISO 14 040-44 :2006 pour les déclarations comparatives.



François Charron-Doucet, ing. M.Sc.A

Directeur scientifique

Groupe AGÉCO

francois.charron@groupeageco.com

## ANNEXE : LISTE DES COMMENTAIRES

Commentaires de la première ronde de revue critique (version préliminaire du rapport du 4 janvier 2018) avec suivi des commentaires restés ouverts **en bleu**.

#	Page/Section/ Paragraphe /figure/tablea u	Type <sup>1</sup>	Commentaires du réviseur	Changement proposé	Réponse de l'auteur	Statut
1	Section Acronyme – p.6	Ed	À l'instar du CTL, il serait intéressant de fournir la traduction française du OSB.	Ajouter la traduction.	Panneaux de lamelles orientées	Fermé
2	Introduction – p.7	Ge	« <i>Les matériaux biosourcés gagnent en intérêt auprès des architectes et ingénieurs à la recherche de solutions novatrices pour réduire l'empreinte environnementale des bâtiments.</i> » Il faut faire attention de ne pas utiliser une formulation qui pourrait laisser sous-entendre un a priori de l'équipe de travail sur la supériorité environnementale des matériaux biosourcés.	Revoir la formulation. Par exemple : <i>Les matériaux biosourcés sont perçus par les architectes et ingénieurs comme une solution novatrice pour réduire l'empreinte environnementale des bâtiments.</i>	Les matériaux biosourcés gagnent en intérêt auprès des architectes et ingénieurs à la recherche de solutions novatrices.	Fermé
3	Introduction – p.7	Ed	Bien que les informations présentées dans cette section soient toutes	Revoir la structure des phrases dans ces paragraphes pour	L'introduction a été restructurée. Voir section 1, page 11.	Fermé

			<p>pertinentes, il semble y avoir un problème avec l'ordre des éléments présentés et le fil qui les rattache.</p> <p>Cela peut nuire à la bonne compréhension des idées présentées.</p> <p>Plusieurs améliorations ont été notées, mais le choix des informations présentées n'est pas toujours pertinent dans le cadre d'une introduction. Voir suggestions et recommandations directement dans la copie PDF du rapport.</p>	<p>assure un fil conducteur dans l'ordre des idées.</p>		
4	Introduction – p.7 – paragraphe 2	Ge	<p>Le terme écoresponsable est généralement considéré comme vague et donc inapproprié dans la formulation d'une question de recherche.</p> <p>Une analyse de cycle de vie ne permet pas de déterminer si un produit ou technologie est écoresponsable ou non. Elle permet seulement d'évaluer et comparer la performance</p>	<p>Il est suggéré d'explicitier les indicateurs qui sont à l'étude ou le type d'enjeux environnementaux qui y sont associés et couvert par cette étude.</p>	<p>Dans la réécriture de l'introduction, les indicateurs qui permettront d'évaluer la performance environnementale des bâtiments ont été ajoutés</p>	Fermé

			environnementale sur la base d'un nombre déterminé d'indicateurs.			
5	Introduction – p.7 – paragraphe 2	Ge	<p>« <i>Un bâtiment de 8 étages de plus de 11 488 m<sup>2</sup> surfaces...</i> »</p> <p>Il est fortement recommandé de présenter le projet Arbora avant de mentionner des paramètres techniques aussi précis.</p> <p>Voir aussi suggestions directement dans le document PDF.</p>	Présenter le projet Arbora	<p>Ce paragraphe a été ajouté dans la réécriture de l'introduction :</p> <p>Le projet arbora est un projet d'envergure en panneaux de bois CLT au Québec. Dans la mission d'offrir aux citoyens des logements de grande qualité, au design et matériaux novateurs, le projet arbora s'étale sur trois bâtiments (A, B et C) dans le quartier Griffintown à Montréal. Aux fins de cette étude, le bâtiment C est celui analysé</p>	Fermé
6	Section 2 – p. 7	Ed	<p>« <i>les émissions y associées</i> ».</p> <p>« <i>La série de normes</i> »</p> <p>Mettre plutôt : « <i>qui y sont associées</i> »</p>	Corriger.	<p>les émissions y associées</p> <p>La série de normes</p> <p>les émissions qui y sont associées (voir section 2, page 12)</p>	Fermé
7	Ensemble des sous-sections de la section 3	Te	<p>Est-ce que l'objectif du projet est d'extrapoler les conclusions de l'étude au-delà du cas spécifique du projet Arbora pour fournir des recommandations sur l'utilisation du CLT en général dans la construction?</p> <p>Si oui, il pourrait être nécessaire de revoir l'hypothèse de l'étude et</p>	Revoir le texte des différentes sous-sections pour assurer une cohérence entre elles (c'est-à-dire élargir la portée de l'objectif et de l'hypothèse ou restreindre celle des autres sections)	<p>L'objectif et les hypothèses ont été reformulés. Voir section 3 et 3.1, page 3</p> <p>L'objectif du projet et l'hypothèse ont été reformulés pour mieux refléter la mission de l'étude. Voir section 3 et 3.1, page 12.</p>	Fermé

			<p>certain aspects méthodologiques.</p> <p>Par exemple, l'objectif ne pourra simplement pas être de valider ou non l'hypothèse de recherche, mais comprendre les facteurs qui jouent en faveur ou défaveur de chaque système et évaluer la pertinence de ces facteurs pour les autres projets de construction.</p> <p>Également, le choix des analyses de sensibilités devrait permettre d'explorer l'influence de facteurs qui vont au-delà des paramètres spécifiques du projet Arbora.</p> <p>Voir suggestion sur la formulation directement dans le texte (section 3 et 3.1).</p>			
8	Section 3.2 – p.8	Te	<p>« <i>mettre en évidence les impacts environnementaux et <u>économiques</u> du cycle de vie</i> ».</p> <p>La méthodologie qui est proposée jusqu'à cette section, c'est-à-dire ISO 14040/44, couvre</p>	<p>Inscrire l'objectif des impacts économiques dans un cadre d'étude adéquat.</p> <p>Étant donné la structure du rapport, il est suggéré de bien séparer ces deux</p>	<p>Le volet économique a été enlevé de ce rapport, étant donné son inscription dans un rapport séparé. Voir section 3.2, page 13</p>	Fermé

			strictement les aspects environnementaux.	analyses dans leur section respective (ou dans deux documents distincts).		
9	Section 3.2 – p.8	Te	À la lumière des sections précédentes, la principale raison de l'étude semble être de positionner la performance environnementale du CLT par rapport à son équivalent en BA. Les raisons ici mentionnées semblent secondaires. Voir cependant un commentaire complémentaire directement dans le texte.	Revoir le texte, si l'interprétation du réviseur est correcte.	Le texte a été modifié pour mieux expliquer la raison de l'étude., voir section 3.2, page 13	Fermé
10	Section 3.2 – p.8	Ge	« <i>Ce projet vise à développer des connaissances sur les matériaux à faible empreinte de carbone</i> ». C'est une formulation trop générale et imprécise pour les objectifs et le champ de l'étude.  La mention de la mesure 19.4.3 est très pertinente. Ne pas hésiter à en faire mention dans l'introduction.	Revoir la formulation. Identifier clairement les matériaux en question.	Cette phase a été modifiée voir section 3.2, page 13 La mesure a été mentionnée dans le paragraphe 2 de l'introduction. Voir section 1, page 11.	Fermé

11	Section 4 - p.9 et 10	Te	Toute cette section devrait être transférée après la présentation des systèmes à l'étude dans une section décrivant les frontières de l'étude et les processus inclus et exclus.	Repositionner cette section.	Le contenu de la section 4 a été repositionné dans la section 4.4. voir page 17-18.	Fermé
	Section 4 - p. 10	Te	La raison qui permet d'exclure les fondations n'est pas l'exclusion de la fonction stationnement, mais le fait que cette composante du bâtiment est similaire entre les options comparées. La même explication devrait s'appliquer aux autres exclusions.	Revoir les justifications des exclusions et déplacer le texte dans les sections appropriées.	Les raisons d'exclusion ont été reformulées. voir section 4.4, pages 19.	Fermé
12	Section 4 - p. 10	Te	« <i>modules de A à C tels que définis dans la norme EN 15804</i> ». Le choix de la norme de référence devrait être plutôt la EN-15978 (Assessment of environmental performance of buildings). L'approche et la nomenclature sont similaires à la EN 15804, mais adaptées à l'évaluation des bâtiments.	Changer la norme de référence et l'introduire plus tôt dans la section méthodologie.	Cette information a été déplacée dans la section méthodologie et la norme changée en EN 15978. Voir section 4.4, page 17	Fermé
13	Section 4 - p. 10	Ed	« <i>Dans la norme EN 15804, la méthodologie décrite du module D, nécessite la pose de plusieurs scénarios et</i>	Revoir cette formulation.	Ce concept est reformulé comme suit : Considérant les pourcentages de recyclage, la fonction	Fermé



			<p><i>hypothèses sur les possibilités de recyclage, la fonction équivalente et conséquents processus de production »</i> Phrase laborieuse.</p>		<p>équivalente et les conséquents processus de production, la méthodologie du module D décrit dans la norme EN 15978, nécessite la considération de différents scénarios et hypothèses. Ceci en raison de la grande variabilité et incertitude à laquelle est liée la fin de vie future du bâtiment (dans 60 ans).</p> <p>Le module D est simplement exclus de l'étude parce qu'il est en dehors du système analysé. Voir section 4.4. dernière ligne du second paragraphe. Page 18</p>	
14	Section 4.1 – p.11	Ed	<p>« bâtiment C ». Préciser à quoi fait référence cette appellation.</p> <p>Voir suggestion directement dans le texte.</p>	Mentionner explicitement que c'est un des noms de référence utilisés dans cette étude pour le bâtiment en CTL	<p>Cette appellation « bâtiment C » est bien contextualisée dans l'introduction section 1, paragraphe 4.</p> <p>En raison de la re-écriture de l'introduction, l'appellation « bâtiment C » est bien mise entre parenthèses et contextualisée dans la section 4.1, paragraphe 1, page 14.</p>	Fermé
15	Section 4.2	Ge	<p>« Avec un total de 100 colonnes (...) » Est-ce que l'on décrit ici seulement des colonnes en bois lamellé-collé</p>	Apporter la précision.	La section 4.2 document une description technique des deux bâtiments. Le premier paragraphe débute avec le bâtiment C et celui après la figure 4 continu avec le bâtiment en béton. voir page 15-	Fermé

					16 et 17	
16	Tableau 3 – p. 14	Te	Est-ce que l'on prévoit une liste pour les matériaux du BA?	Ajouter la liste	Oui, une colonne a été ajoutée au tableau 9 pour lister et quantifier les matériaux utilisés pour la construction du bâtiment en béton. Voir section 5.1 page 28-29 et 30	Fermé
17	Section 4.4 – p. 14	Te	« y compris les intrants et extrants des infrastructures ne seront pas analysés » Que voulez-vous dire par cette phrase?  Intégrer cette discussion avec celle sur les éléments inclus et exclus.  Si je comprends bien, vous voulez dire « les infrastructures et biens en capital nécessaires à la production des intrants au système ». Ajouter la précision si c'est bien le choix méthodologique qui a été fait.	Clarifier et déplacer	Cette phrase a été changée en « les infrastructures ne seront pas analysés. » elle se trouve dans la section 4.4 La phrase a été modifiée comme suit : Dans cette étude, les infrastructures et biens en capital nécessaires à la production des intrants au système ne sont pas analysés. voir section 4.4, dernière phrase du paragraphe 3, page 19.	Fermé
18	Figure 5		Selon le schéma, les limites de l'ACV environnementale semblent exclure les étapes A1-A3 (pointillé rouge)  Suggestion : faire référence à EN 15978 qui est similaire,	Revoir la figure.	En raison de l'absence du volet économique dans ce rapport, la figure 5 a été refaite tenant compte de l'observation mentionnée. Voir section 4.4, page 18. La norme ISO EN 15978-2012 a	Fermé

			mais spécifique au bâtiment.		été citée comme référence	
19	Section 4.5	Te	<p>Idéalement, le critère de cut-off devrait mentionner s'il s'applique au processus, à l'étape du cycle de ou le total du cycle de vie.</p> <p>Couramment dans ce genre d'étude, on utilise 1% pour le processus et un maximum de 5% pour l'ensemble de l'étape du cycle de vie.</p>	Fournir la précision	Cette précision a été apportée dans la section 4.5, pages 20	Fermé
20	Section 4.6 – tableau 4 et 5	Te	<p>La description des sources de données devrait mieux différencier le flux intermédiaire des données d'inventaire du cycle de vie (ICV).</p> <p>Par exemple, la quantité et la nature d'un flux intermédiaire sont la quantité et le type de béton utilisé. La donnée ICV est le processus ecoinvent utilisé pour modéliser la production de béton.</p> <p>Les flux intermédiaires peuvent être des données primaires ou secondaires. Dans cette étude, il est attendu que les données ICV seront essentiellement des données secondaires.</p>	Revoir la structure des tableaux pour documenter de façon plus transparente la fonction de chaque source de données.	Cette structure de tableau est considérée dans la section 5 qui touche en détail les aspects ICV. Cette section commence à la page 27.	Fermé

			<p>Dans ce contexte, les données provenant du modèle BIM fourniront les flux élémentaires pour modéliser les modules A1-A3 et les données ICV pour ces mêmes modules proviendront d'Athena, ecoinvent, etc.</p> <p>Pour le module A5, seules les sources d'information qui permettent de caractériser les processus sur le chantier (ex. utilisation de la machinerie, chauffage durant la construction, etc.) devraient être mentionnées.</p> <p>Voir commentaires plus bas sur la section 5.</p>			
21	Section 4.6	Te	<p>La section 4.2.3.6.1 de la norme ISO 14044 demande que les exigences en matière de qualité des données soient spécifiées dans les objectifs et le champ de l'étude.</p> <p>Le but est de déterminer le seuil minimum de qualité qui est jugée nécessaire pour atteindre les objectifs de</p>	Fournir la liste des exigences sur la qualité sur l'ensemble des paramètres de la norme ISO 14 044.	<p>Les critères de qualité des données sont représentés dans une matrice de Weidema. Section 4.6, Page 12</p> <p>Les modifications nécessaires ont été apportées au tableau 4, page 21</p>	Fermé

		<p>l'étude. Pour les études comparatives pour divulgation publique, les exigences minimales pour tous les paramètres de qualité présentés dans la norme ISO 14044 doivent être définies.</p> <p>Une méthode systématique de documentation de la qualité des données comme la matrice de Weidema peut être utilisée pour couvrir plusieurs des éléments de la liste. D'autres peuvent être discutés de façon qualitative.</p> <p>Des améliorations importantes ont été apportées à cette section. Cependant, il persiste une certaine confusion autour du tableau 4. Est-ce bien les critères de qualité des données ou c'est une description de ces données? Voir aussi commentaires spécifiques directement dans le document.</p> <p>[Suivi] Il y a toujours un problème avec l'analyse de la</p>			
--	--	--	--	--	--

			qualité des données (qui est d'ailleurs absente dans la section interprétation)			
22	Section 4.6		Selon la norme ISO 14044, une étude ACV comparative divulguée au public doit présenter une analyse d'incertitude (section 5.3.1).	Indiquer comment l'incertitude sera évaluée dans cette étude.	Les informations sur l'analyse de sensibilité ont été ajoutées dans la section 4.8.7. Pages 27	Fermé
23	Section 4.7 p.18	Ed	« Celle massive réduire les impacts »	Corriger.	« Réduire » est changé en « réduit »	Fermé
24	Section 4.7 p.18	Te	« En considérant le CLT comme un unique produit issu du processus de transformation, aucune procédure d'allocation ne sera attribuée ». La description du choix de la méthode d'allocation apparaît imprécise. Est-ce que l'hypothèse est une allocation économique en considérant négligeable la valeur économique des coproduits?	Ajouter les précisions.	La précision a été ajoutée dans la section 4.7, page 23	Fermé
25	Section 4.7 p.19	Te	« Cette énergie produite sera réinjectée dans le système et une analyse de sensibilité sera effectuée. » Le choix de méthode d'allocation n'est pas clair. Est-ce qu'on parle de recyclage en boucle fermée,	Décrire précisément le choix d'allocation pour ce processus.	Cette partie de texte a été réécrite. Voir section 4.7, paragraphe 3, pages 23-24	Fermé

			<p>extension des frontières, approche cut-off (voir section 7.2.6 dans ISO 21 930:2017)?</p> <p>Voir cependant commentaires #26</p>			
26	Section 4.7 p.19	Te	<p>« <i>L'approche recyclée est celle appliquée dans cette étude</i> »</p> <p>La description des deux types d'approche est quelque peu approximative. Je doute que cette terminologie soit utilisée ailleurs dans les documents normatifs.</p> <p>Dans ce contexte, bien décrire les implications de ce choix d'allocation (ex. la ferraille collectée pour produire un nouvel acier n'a pas de fardeau environnemental qui y est associé).</p> <p>Malheureusement, la nouvelle description ne permet toujours pas au lecteur de comprendre les subtilités entre les choix d'imputations.</p> <p>Cet aspect méthodologique est toujours très difficile à</p>	Décrire précisément le choix d'allocation pour ce processus.	<p>Dans le cas de l'acier, les deux approches ont été mieux détaillées. Voir section 4.7, paragraphe 4, pages 14-15.</p> <p>Les modifications appropriées ont été faites. Voir section 4.7, page 23</p>	Fermé

			<p>expliquer, car il y a une absence de consensus sur la terminologie et même parfois l'application des différentes règles.</p> <p>Le réviseur a suggéré directement dans le texte quelques références additionnelles qui peuvent être utilisées pour aligner la terminologie et la description avec ce qui existe déjà dans la littérature.</p>			
27	Section 4.7	Te	<p>Les choix de procédures d'allocation sont manquants pour la fin de vie du béton et de l'acier.</p> <p>Ces choix peuvent être couverts par une discussion sur les règles qui seront appliquées par défaut à tous les processus pour ainsi assurer la cohérence des systèmes comparés. Ainsi seules les déviations de ces règles par défaut ont à être documentées dans cette section.</p> <p>Cependant, voir <a href="#">commentaire # 26</a></p>	Fournir les hypothèses sur les procédures d'allocation par défaut pour l'ensemble du cycle de vie. Si pertinent mentionner si des règles d'allocation dans les données ICV peuvent différer.	Les procédures d'allocation ont été documentées comme indiqué dans la section 4.7, paragraphes 5 et 6, page 24.	Fermé
28	Section 4.8	Te	« La connaissance des	Vérifier la complétude	Une description complète des	Fermé



			<p><i>impacts des bâtiments étudiés dans les catégories non analysées par la méthode TRACI y compris l'extraction d'énergie, se fera via la méthode Impact 2002+ qui servira aussi de méthode de comparaison des résultats ».</i></p> <p>Fournir une description complète des catégories d'impact qui seront utilisées dans le calcul des résultats principaux (voir section 4.4.2.2.1 de la norme ISO 14044). Fournir les sources et les versions précises des méthodes qui seront utilisées.</p> <p>L'utilisation d'autres méthodes pour de fins de comparaison peut être alternativement décrite dans une section présentant les analyses de sensibilités.</p> <p>Ajouter également la version utilisée pour la méthode IMPACT 2002+</p>	<p>de la description de la méthodologie d'évaluation des impacts du cycle de vie.</p>	<p>catégories d'impact a été faite dans la section 4.8, après le tableau 8, pages 25-26</p> <p>Les versions des respectives méthodes (TRACI et IMPACT 2002+) d'analyse d'impacts ont été mises à jour dans le texte de la section 4.8, paragraphe 1 et 2, pages 24.</p>	
29	Section 4.8	Te	Pouvez-vous décrire la méthodologie pour certains	Vérifier la complétude de la description de la	Ces aspects ont été développés dans la section 4.8, à la page 26	Fermé

			<p>aspects pertinents pour ce type de comparaison? Par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capture, séquestration et émissions du carbone biogénique</li> <li>- Carbonatation du ciment et béton</li> <li>- Émissions GES provenant du changement de l'utilisation des terres.</li> </ul> <p>(voir ISO 21930 :2017 pour plus de détails)</p> <p>Je ferais cependant une distinction entre ces deux sous-sections et les précédentes. Ce sont davantage des questions d'inventaire que de EICV.</p>	<p>méthodologie d'évaluation des impacts du cycle de vie. Certains de ces éléments peuvent être aussi être discutés dans la section traitant de l'inventaire.</p>	<p>du rapport.</p> <p>Nous ne traiterons pas les émissions GES liées aux changements de l'utilisation des terres car les terres ne changent pas d'utilisation après prélèvement du bois.</p> <p>Pour des raisons d'incertitudes au niveau des calculs de la CO2 absorbé en fin de vie par le béton, la carbonatation a été exclue de l'analyse.</p>	
30	Tableau 6 p.19	Ed	<p>Assurez-vous d'avoir une traduction le plus fidèle possible des catégories d'impacts utilisés. En particulier revoir la traduction de la catégorie Pollution qui serait plutôt Effets respiratoires. De plus, l'unité dans la dernière version de SimaPro serait plutôt kg PM2.5 eq.</p>	<p>Revoir la traduction et les unités.</p>	<p>La traduction a été vérifiée et modifiée. Section 4.8, tableau 7, page 25-26</p>	Fermé

			Idem pour Acidification, l'unité est plutôt kg SO2 eq.			
31	Section 4.10	Ge	La liste des limites de l'étude apparaît incomplète, mais pourra être complétée à la lumière de l'interprétation des résultats.	Liste à compléter	Elle a été complétée à la section 10, page 59-60	Fermé
32	Section 4.11	Te	« <i>En fonction du type d'étude et auditoire visé (voir sections 3.3 et 3.5), le choix d'un réviseur externe indépendant satisfait aux critères indiqués par ILCD (2012).</i> » Les directives du ILCD Hanbook – Review schemes for Life Cycle Assessment indique plutôt la nécessité de recourir à un panel d'experts.	À discuter.à  Voir section Méthodologie de la revue du rapport de revue critique pour la conclusion sur ce point.	À discuter!	Fermé

**Commentaires de la deuxième ronde de revue critique (version du rapport préliminaire 2018-05-28) avec suivi des commentaires restés ouverts en rouge**

#	Page/Section/Paragraphe/figure/tableau	Type <sup>1</sup>	Commentaires du réviseur	Changement proposé	Réponse de l'auteur	Statut
33	Section 5.1 / p. 20	Te	Est-ce que les quantités affichées au tableau 11 sont obtenues directement du modèle BIM ou des hypothèses et manipulations sont nécessaires pour obtenir	Si oui, décrire la nature des manipulations qui sont exécutées et leur impact sur la qualité de l'inventaire.	Les volumes des éléments en acier ou en aluminium ont été calculés sur base des fiches techniques et des données BIM car BIM définis les volumes pleins et non des volumes profilés. Les	Fermé

			des m2 et m3?		profils des éléments, les surfaces et espace inter axe d'installation sont prises en compte comme par exemple pour le colombage en acier léger dans les murs et les suspends en aluminium des plafonds. Les quantités des autres matériaux sont obtenues de BIM. Voir la section 5.1, page 27-28	
34	Section 5.1 / p. 21	Te	Dans le tableau 11, on observe une différence importante pour les montants métalliques entre les deux bâtiments. Est-ce que la différence s'explique par la réduction de la hauteur des plafonds pour la tuyauterie?	Fournir l'explication.	Les données d'acier et aluminium ont été recalculées et les nouvelles données sont présentées dans le tableau 9. Voir section 5.1, pages 29-30	Fermé
35	Section 5.1 - Tableau 11	Ed	Certains matériaux ont une valeur zéro pour les deux types de bâtiment. Est-ce bien une valeur zéro ou c'est simplement arrondi à zéro?	Arrondir au chiffre significatif.	Dans les deux premières colonnes de gauches, les valeurs zéro indiquent simplement l'absence totale de ce matériau dans le bâtiment indiqué tandis que dans la dernière colonne (différences), elles indiquent une égalité de quantité de matériaux dans les deux bâtiments. Voir tableau 9, pages 29-30.	Fermé
36	Section 5.1 - Tableau 11	Ge	À la ligne <i>Porte – cadre</i> et <i>Porte – panneau</i> , est-ce bien les mêmes matériaux pour les deux bâtiments.	Préciser les matériaux et assurer la cohérence avec les explications de la page 21.	Oui, ce sont les mêmes matériaux et les mêmes quantités. Les différences entre les deux bâtiments sont nulles (0). Les	Fermé

			<p>Pourtant, en début de section, il est mentionné que les portes principales des logements ne sont pas faites dans le même matériau. Cela ne semble pas apparaître dans le tableau 9.</p>		<p>battants des portes en acier sont composés d'un châssis intérieur fait de deux (2) montants et trois (3) traverses et de deux plaques de recouvrement. Les cavités sont remplies d'isolant acoustiques (voir page 31)</p> <p>Cette spécificité sur les matériaux des portes principales des logements dans les deux bâtiments a été retirée de la section 5.1, car ceci était une affirmation incertaine. Elle n'a pas été considérée dans les ICV et par conséquent dans le modèle.</p> <p>Ce sont les mêmes matériaux qui ont été considérés pour les portes principales des logements des deux bâtiments. Voir Page 28. Une note a été ajoutée au 2e paragraphe de la section 4.3, dernière phrase pour préciser que dans ce cas d'étude cette différence au niveau des portes principales des logements n'a pas été prise en compte.</p>	
37	Section 5.3	Te	<p>« Les matériaux composites comme par exemple, le panneau « prodema » sont décomposés en différents constituants (placage, résine, âme) ».</p>	<p>Mentionner la complétude des données utilisées pour la production des produits de construction.</p>	<p>Le matériau composite panneau « prodema » est décomposé de placage et âme en résine phénolique. La modélisation de ce panneau tiendra compte de la production de chaque</p>	Fermé

			Est-ce que la donnée d'inventaire inclura seulement l'impact des différents matériaux ou un effort additionnel est fait pour ajouter l'impact de production des assemblages (lorsque non disponible dans ecoinvent ou autres banques de données ICV)?		composante en négligeant les impacts de production des assemblages. (voir page 31)	
38	Section 5.5 – tableau 12	Te	Il semble y avoir un problème avec le calcul pour les <i>Montants en acier galv. 92mm</i> et <i>Métal – montants</i> . La valeur semble trop élevée.	Revoir les calculs	Les volumes des produits en acier ont été recalculés. Voir tableau 11, page 30.	Fermé
39	Section 5.5 /p.29	Ed	« <i>la consommation énergétique liée au transport de la main d'œuvre par voyage est de 20,5 GJ (...)</i> » À quel voyage fait-on référence?  <b>Nouvel ajout :</b> « <i>car les chantiers durent deux (2) fois plus longtemps, comparés aux constructions en bois d'ingénierie</i> ». Une réduction de 50% de la construction est sans doute le cas le plus extrême dans la littérature.	Clarifier  Est-ce que vous avez des raisons de penser que le cas extrême s'applique à ce projet. Sinon, choisir une hypothèse plus dans la moyenne de ce qui se trouve dans la littérature.	Il s'agit des déplacements des travailleurs entre entreprise et site de construction.  <b>Dans ce cas d'étude, la considération de la réduction de 50% de la durée de chantier a été fonction de la portée du projet Arbora. Comme mentionné dans la section 3.2, c'est un projet qui présente une superficie plancher très importante comparativement à d'autres bâtiments construits en bois d'ingénierie au Canada.</b>	Fermé
40	Section 5.6	Ge	La description des sources de	Ajouter l'information à	Ceci découle des informations	Fermé

			données à la section 4.6 et les explications fournies dans cette section ne permettent pas de bien comprendre la méthodologie pour estimer la consommation des autres équipements. Est-ce que ce sont des informations collectées auprès des entrepreneurs ou des estimations de l'équipe de projets?	la section 4.6 ou 5.6.	collectées auprès des entrepreneurs	
41	Section 5.6/ p. 29	Te	« <i>Ils varient de 0% pour le béton préfabriqué (...)</i> » et « <i>Dans ce cas d'étude, le total de déchets généré lors de la phase de construction s'estime à 1 330 tonnes</i> ». Cela ne correspond pas aux chiffres et hypothèses dans le tableau 14 et le texte à la page suivante.	Revoir les chiffres du tableau ou les explications.	Les modifications nécessaires sont présentées à la section 5.3.2, tableau 12 page 35. Les volumes ont variés avec la modification des volumes recalculés des produits en acier et aluminium.	Fermé
42	Section 5.13 – tableau 20	Te	« les moyennes d'énergie consommée (MJ) par kg de matériaux démolis est 0,263 et 0,107 (...) » Est-ce que ce calcul est basé directement sur les informations trouvées dans cette source : Athena 1997?	Ajouter la source dans la bibliographie.	L'explication du calcul de pondération est présentée à la section 5.5.1 page 41. La référence a été ajoutée à la liste de référence.	Fermé
43	Section 5.16 / p.37	Te	« <i>Ceci veut dire que 80% du carbone biogénique est</i>	Si oui, revoir les explications à la section	Les scénarios de gestion de déchets analysés sont	Fermé

			<p><i>encore séquestré dans le nouveau produit fabriqué</i> ».</p> <p>Est-ce que le modèle suppose alors une séquestration permanente du carbone?</p> <p>Les explications sur les émissions biogéniques restent un peu trop approximatives. Il faudrait faire mention des émissions de méthane biogénique qui ne vont pas toujours aboutir à un bilan « nul ». Aussi, l'IPCC n'a pas d'opinion sur la réalisation d'ACV. Ils ont seulement des directives sur les inventaires nationaux. La dernière phrase de cette section est donc problématique dans le contexte ACV.</p>	<p>4.8.6.</p> <p>Aussi, si c'est le cas, il y a possiblement un risque de contradiction avec ISO 21930 :2017. À discuter si tel est le cas.</p>	<p>l'enfouissement et l'incinération car Le recyclage, la valorisation énergétique et la réutilisation ne sont pas considérés car en dehors des limites du système étudié. (voir section 5.5.4, page 43)</p> <p>Dans les précédentes versions du rapport, les sections sur la séquestration et stockage du carbone biogénique ainsi la carbonatation du ciment étaient mentionnées.</p> <p>En raison de l'exclusion de la carbonatation du ciment, la section sur la séquestration et stockage du carbone biogénique est aussi exclue dans un souci de consistance.</p> <p>Cette exclusion n'affecte pas les résultats présentés car le carbone biogénique n'avait pas été comptabilisé dans la modélisation.</p> <p>En fin de vie et en fonction des scénarios de fin de vie analysée (enfouissement et incinération), les résidus de bois (à hauteur de 1%) sont incinérés et 0% enfouis.</p>	
--	--	--	---	---	---	--



					<p>Voir tableau 20, page 44.</p> <p>Ceci est la raison pour laquelle, je ne mentionne pas les émissions de méthane (CH<sub>4</sub>) associé à l'enfouissement des résidus de bois.</p> <p>Ces ratios reflètent exactement le contexte québécois actuel selon les données 2015 de Recyc-Québec publiées en 2017.</p>	
44	Section 5.16 / p.37	Te	« Cette étape de concassage entraîne une carbonatation prise en compte dans cette étude. » Est-ce que vous avez déterminé les paramètres pour la carbonatation pour le scénario de fin de vie? Ils sont sans doute différents des hypothèses de la section 4.8.7.	Décrire ces hypothèses.	La carbonatation du béton est exclue de l'analyse en raison de l'incertitude des calculs des aires (A) exposé des particules de béton. À cet effet, la section sur la carbonatation a été retirée du document.	Fermé

**Commentaires de la troisième ronde de revue critique (version du rapport du 10 mai 2019) avec suivi des commentaires restés ouverts en rouge.**

#	Page/Section/Paragraphe/figure/tableau	Type <sup>1</sup>	Commentaires du réviseur	Changement proposé	Réponse de l'auteur	Statut
45	Section 5.6	Ge	Une particularité de votre	Considérer l'option	Dans le cadre de cette étude, les	Fermé

			étude est l'hypothèse d'une gestion exemplaire des résidus de construction avec des taux d'enfouissement très faible, voire nul, pour plusieurs matériaux. Il serait intéressant de tester des hypothèses moins favorables. Surtout que c'est possiblement sensible pour le système constructif en bois.	d'ajouter une AS sur la fin de vie des matériaux.	ratios de quantité de matériaux de construction utilisés dans la modélisation de l'étape de fin de vie sont des données issues du rapport 2015 de Recyc-Québec. Compte tenu du fait ces données sont représentatives de la gestion de la matière résiduelle au Québec, il n'a pas été jugé pertinent de faire une analyse de sensibilité sur ce point.	
46	Section 6, p.46	Te	À l'exception de la catégorie changements climatiques, les résultats de la méthode IMPACT 2002+ qui sont présentés sont ceux des catégories de dommage (endpoints). Vous ne pouvez donc pas valider les résultats de des catégories d'impact de TRACI (midpoints). Les endpoints offrent plutôt une perspective différente qui n'est pas possible d'obtenir avec TRACI. Pour valider les résultats de TRACI, il faudrait utiliser les catégories midpoints équivalentes dans IMPACT 2002+. L'idée étant de tester comment un changement par rapport aux	Revoir le choix des méthodes pour valider les résultats et discuter des résultats si vous offrez des perspectives (ou des catégories d'impact regroupées sous des endpoints) différentes. Si vous décidé de retirer ces nouvelles perspectives, il serait souhaitable d'en discuter dans la section limite de l'étude.	Je te remercie d'avoir soulevé ce point. Dans la section 6, la précision a été ajoutée pour mettre en évidence le fait que la validation des résultats obtenus avec la méthode TRACI est faite avec les catégories d'impacts intermédiaires de la méthode Impacts 2002+. En plus, le fait de ne pas effectuer la validation sur la base des catégories de dommages a été mentionné dans la section limite de l'étude. Voir section 11, dernier paragraphe.	Fermé

			<p>modèles environnementaux sous-jacents à un impact sur la conclusion.</p> <p>Ici, il est étrange d'offrir une nouvelle perspective, comme la qualité des écosystèmes et de ne pas en discuter dans l'interprétation.</p>			
47	Section 7.1	Ge	<p>Il faut faire attention avec l'utilisation des pourcentages pour la comparaison. Vous avez exclu des frontières du système les fondations. L'impact total des bâtiments n'est pas pris en compte dans la différence relative. Par conséquent, le 20% de différence peut apparaître plus important que si les fondations avaient été incluses. Il ne faut pas laisser penser que l'utilisation du bois pourrait réduire de 20% les impacts de l'ensemble du systèmes constructifs.</p>	<p>Ajouter une mise en garde dans la section résultats et celle sur la discussion.</p>	<p>Une mise en garde a été ajoutée dans la section résultats (section 7) premier paragraphe: Cette section présente les résultats des analyses de cycle de vie comparatives réalisées. Comme mentionné à la section 4.4, différents éléments du bâtiment ont été exclus de l'inventaire pour plusieurs raisons. Les raisons ont été mentionnées dans la même section 4.2. Compte tenu de ces exclusions, et des spécificités de l'étude (voir section 4.3), il serait prudent de ne pas généraliser les résultats de cette étude, car elle demeure une étude de cas.</p> <p>La même chose a été faite dans la section discussion (section 8), premier paragraphe.</p>	Fermé
48	Section 7.1 Première phrase	Te	<p>Les résultats en valeur absolue pour 4 des 5 catégories d'impact ne sont pas disponibles dans le</p>	<p>Ajouté un tableau avec les scores en valeur absolue (idem pour IMPACT 2002+)</p>	<p>Le tableau des scores en valeur absolue a été ajouté en-dessous de chaque figure.</p>	Fermé

			rapport.			
49	Figure 13	Ge	<p>Les résultats présentent la comparaison pour la structure seulement. Cependant, sauf erreur, on ne retrouve pas dans le rapport une description détaillée des matériaux (type et quantité) qui composent les structures. Il est donc difficile de mettre en contexte ces résultats.</p> <p>La comparaison pose probablement un problème d'un point de vue de l'équivalence fonctionnelle. Il serait plus utile et moins problématique de montrer de façon comparative la contribution de l'ensemble des éléments des systèmes constructifs (structure, enveloppe, construction intérieure, etc.)</p>	Revoir et contextualiser la présentation des résultats comparatifs des structures.	Les données d'inventaires, les proxies de modélisation et les quantités telles que modélisées sont présentés en annexe 5.	Fermé
50	Figure 14	Ed	<p>La légende de cette figure et la suivante manquent de précision. Par exemple, mentionner que c'est la production des matériaux. Est-ce que l'opération tient seulement compte de l'énergie ou également du</p>	Ajouter des précisions dans la légende et dans le texte.	<p>De la précision a été ajouté dans les figures et dans le texte.</p> <p>De plus, un paragraphe a été ajouté à la section 7.2 (2 paragraphe) pour présenter la contribution des modules transport matériaux (A4), réparation (B3), remplacement (B4) et besoin en eau (B7) et</p>	Fermé

			remplacement des matériaux? À quelle étape retrouve-t-on le transport des matériaux (A4)?		consommation en énergie électrique (B6)	
51	Figure 16	Te	Sur cette figure, la production du béton dans le système constructif en béton semble 8 fois plus impactant que dans le système en bois, mais dans l'inventaire on ne retrouve pas une si grande différence entre les quantités de béton utilisées entre les deux systèmes.	Vérifier et expliquer ce résultat.  Pourtant au tableau 8, on ne retrouve pas une différence aussi grande en termes de quantité de béton utilisé. Par conséquent, je ne comprends pas comment on peut obtenir une différence 8x au niveau des impacts.  Note : Question réglée au téléphone : différence entre les types de béton et dans les BD utilisées.	Les données d'inventaire ont été vérifiées pour le matériau béton 30-32 MPa. Il est utilisé à des fins structurales. De ce fait, il constitue la structure des huit étages du bâtiment en béton tandis qu'il n'est qu'utilisé au niveau du Rez-de-chaussée dans le cas du bâtiment en bois. Ceci explique le fait que ce matériau soit 8 fois plus important (volume et impacts) dans le bâtiment en béton comparativement au bâtiment en bois.	Fermé
52	Figure 16	Ed	La liste des matériaux à la figure 16 est soit incomplète ou soit des regroupements ont été faits par rapport à la liste des matériaux dans l'inventaire (tableau 9).	Expliquer si tous les matériaux sont inclus ou non à la figure 16. Si oui, fournir les clés pour comprendre les regroupements. Si non, expliquer comment le	Dans la figure 16 tous les matériaux ont été représentés. Ils sont regroupés comme présenté dans le tableau 23 de la section 7	Fermé

				choix des matériaux présenté a été fait.		
53	Figure 16	Te	<p>L'analyse de contribution soulève d'intéressantes questions qui m'ont poussé à requestionner l'inventaire des matériaux de construction. Une analyse comparative avec Durlinger et al. 2013 montrent des différences de quantité de matériaux par m<sup>2</sup> très significative. Par exemple, ce projet semble utiliser beaucoup moins de kg de CLT par m<sup>2</sup> (plus qu'un facteur 10 de différence par m<sup>2</sup>).</p> <p>Les variations sur les quantités de béton (même en considérant l'exclusion des fondation) est étonnante.</p>	<p>Pouvez-vous expliquer les différences aussi importantes entre ces projets. Aussi, faites un rappel de la procédure pour valider la qualité des données de l'inventaire.</p>	<p>Dans le présent projet, les données d'inventaire ont été fournis par la firme d'architecture Provencher_Roy en accord avec Sotramont qui est le promoteur du projet de construction des bâtiments Arbora.</p> <p>Ces données d'inventaire ont été extraites du logiciel BIM. Les volumes des matériaux pleins comme le béton, le bois, le gypse ont été inventoriées tel que extraits de BIM. Cependant, pour les matériaux profilés comme le colombage en acier, les revêtements extérieurs en aluminium et bien d'autres, les quantités unitaires ont été calculées sur la base des fiches techniques des matériaux. En fonction du produit, la quantité totale de matériaux calculée était fonction des surfaces ou des mètres linéaires des composantes du bâtiment sur lesquelles ces produits étaient installés (ex : colombage) ou encore du nombre (porte/fenêtre). Les données de surface et longueur ont été extraites de BIM.</p>	Fermé

					<p>En comparaison aux données issues de l'étude des auteurs Durlinger et al., les quantités de bois et de béton structural par m<sup>2</sup> de plancher inventoriées dans le présent projet sont inférieures. Le bâtiment analysé dans le présent projet présente un surface plancher de 13776 m<sup>2</sup> contre 1755 m<sup>2</sup> des auteurs. Sur la base des données publiées par les auteurs et après estimation du volume de bois et de béton utilisé par m<sup>2</sup> de surface plancher, il résulte que le bâtiment Arbora consomme moins de matière. En effet, les volumes de bois et de béton structural utilisés dans le projet Arbora sont respectivement 0,2 m<sup>3</sup> et 0,27 m<sup>3</sup> par m<sup>2</sup> plancher comparativement à 0,55 m<sup>3</sup> et 0,9 m<sup>3</sup> par m<sup>2</sup> plancher dans le cas de l'étude de Durlinger et al., Ces différences représentent un facteur de 2 pour le bois et de 3 pour le béton. Celles-ci peuvent s'expliquer par les exigences du code du bâtiment en matière de sécurité des structures, qui varient d'un pays à un autre.</p>	
54	Figure 16	Ed	La légende de cette figure (et de plusieurs autres aussi) manque de précision.	Je suggère d'utiliser de façon uniforme un identifiant pour les	Les légendes des figures ont été modifiées	Fermé

				différents scénarios à l'étude.		
55	Section 7.4	Ed	« le bâtiment en bois engendre une réduction additionnelle des émissions de GES de 11% ». Ce serait plutôt 13% selon les résultats exprimés en kt présentés un peu plus bas.	Revoir	Le calcul a été revu en conséquence	Fermé
56	Section 7.4	Te	La réduction de 47% de l'impact en eutrophisation pour une seule composante du bâtiment défie toute logique. Cela indique généralement un problème avec les données pour calculer cet indicateur.	Vérifier la qualité des données pour l'indicateur eutrophisation.  Le HCFC-124 n'est pas une substance qui contribue à l'eutrophisation. Il faudrait revoir cette analyse.  Ce commentaire a été réglé durant un appel téléphonique.	Après analyse du matériau acier, la substance qui contribue le plus aux impacts pour la catégorie eutrophisation est la Éthane, 2-chloro-1,1,1,2-tetrafluoro-, HCFC-124. Cette substance est absente dans le processus de production du bois d'œuvre. Le changement du colomage en acier par le colomage en bois est à l'origine de cette importante différence	Fermé
57	Section 7.4 Figure	Ed	Cette figure n'a pas de titre. Également, pour toutes les analyses de sensibilité du chapitre 7, Il serait plus agréable pour le lecteur de mettre également le scénario de base (avant modification par l'AS) sur le graphique	Revoir la présentation des figures.	La présentation des figures a été modifiée	Fermé



			<p>pour éviter de devoir se référer à la figure 11.</p> <p>Finalement, il serait souhaitable de revoir la légende pour identifier le scénario qui est modifié par l'AS.</p>			
58	Section 7.5	Ge	<p>« <i>La considération que la superficie plafond couverte soit égale pour les deux bâtiments analysés (...)</i> »</p> <p>Cette description ne permet pas de bien comprendre ce que vous avez modélisé exactement dans cette AS.</p> <p>Si je comprends bien, les deux scénarios sont modifiés ici. Est-ce bien le cas?</p> <p>Il faudrait minimalement une description des matériaux et des quantités additionnels (ou des réductions).</p> <p>Commentaire applicable aussi à l'AS de la section 7.6.</p>	Mieux décrire les AS.	Les différentes analyses de sensibilités ont été décrites dans la section appropriée (5.6). Les différents tableaux d'inventaire sont présentés en annexes 7-10 du rapport	Fermé
59	Section 7.6	Ge	<p>Dans quelle mesure cette AS (ainsi que celle de la section 7.5) sont pertinentes ou réaliste?</p> <p>Est-ce que ce sont des scénarios qui ont été réellement considérés par les</p>	Mettre en contexte les AS présentées par rapport aux objectifs de l'étude.	Les AS ont été mis en contexte dans section 5.6 qui décrit les AS	Fermé

			concepteurs? Pouvez-vous expliquer l'objectif et le contexte de ces deux AS?			
60	Section 7.7	Ed	« (...) la variation de +/- 25% du volume de béton et armature dans le bâtiment en béton indique une variation de +/- 7% des émissions de GES dans le bâtiment en bois. » Est-ce qu'il y a une erreur dans cette phrase? Pourquoi indique-t-on qu'une variation de volume dans le bâtiment en béton engendre une variation sur les résultats de celui en bois?	Revoir	Oui, il y'a une erreur dans cette phrase. Le texte de la section 7.7 a été réécrit.	Fermé
61	Section 7.7	Ge	Le scénario -25% de béton remet en question les conclusions sur plusieurs catégories d'impact (voir également commentaire plus base sur la qualité des données et l'incertitude). Pouvez-vous expliquer pourquoi vous avez choisi cette valeur de 25%? Est-ce que cette variation est réaliste par rapport à la qualité de la modélisation du système en béton?	Ajouter une analyse plus complète à cette AS.  Merci pour les explications. Cependant, dans le texte on parle de marge d'erreur qui normalement devrait couvrir une réduction ou une augmentation de la quantité de matériaux. Pourquoi	L'estimation des quantités de béton a été faite aux meilleurs des connaissances des professionnels et sur la base des pratiques courante dans le domaine de la construction. En raison du fait que le bâtiment en béton est un bâtiment qui n'a pas été construit, les quantités estimées sont sujet à variation. Cette variation (%) est fonction du stade dans le lequel se situe le projet. Elle peut être > à 25% en phase de pré faisabilité et de 5% en phase de réalisation. Sur cette	Fermé

				exclure le -25% ici?	base, la valeur de 25% a été choisie. Toutefois, je conviens avec vous que l'analyse de sensibilité avec -25% n'est réaliste. De ce fait, il sera enlevé du rapport.  L'analyse de sensibilité -25% de volume de béton et d'armature a été ajouté dans le rapport	
62	Section 8 - Premier paragraphe	Ge	Originalité de l'étude : Pouvez-vous décrire plus précisément les spécificités qui distinguent cette étude par rapport aux autres études similaires? Par exemple, comment le code du bâtiment diffère des autres régions du monde où des études similaires ont été publiées?	Soyez plus spécifique et convaincant sur l'originalité de cette étude	Une section (4.3) sur l'adaptation des bâtiments a été ajoutée au rapport. Les spécificités sur l'originalité font référence à cette nouvelle section.	Fermé
63	Section 8 – troisième paragraphe	Ge	« (...) le bâtiment en bois présente plus de matériaux que le bâtiment comparable en béton » Cette affirmation semble incorrecte. Selon le tableau 9, en termes massiques, le bâtiment en béton a presque deux fois plus de matériaux que celui en bois. Est-ce que vous parlez de certains types	Revoir cette affirmation.	Oui, je parle des composantes enveloppe, cloison, escalier et plafond. La quantité massique indiquée dans le tableau 9 est fonction des masses volumiques des matériaux qui sont élevées dans le cas de l'acier et du béton comparativement au bois. Du fait que le bâtiment en béton contient plus d'acier et de béton que le bâtiment en bois, le bilan	Fermé

			de matériaux seulement?		massique des matériaux est conséquent.	
64	Section 8 – troisième paragraphe	Ge	<p>« <i>La réalisation d’analyses de sensibilité améliore le profil environnemental (...)</i> »</p> <p>Faire une analyse de sensibilité ne peut pas améliorer le profil d’un système, elle montre seulement l’impact sur les résultats de la variation d’un ou plusieurs paramètres.</p>	Revoir la formulation.	Cette phrase a été restructurée pour mieux refléter les impacts des paramètres sensibles sur les résultats	Fermé
65	Section 8 – troisième paragraphe	Ed	<p>« (...) <i>en fonction de la sensibilité analysée, les quantités de matériaux du bâtiment en bois sont additionnées aux matériaux du bâtiment en béton.</i> »</p> <p>Je ne comprends pas cette affirmation.</p>	Revoir cette affirmation.	Cette phrase a été restructurée pour faciliter la compréhension. Voir paragraphe 3 section 8	Fermé
66	Section 8 – troisième paragraphe	Ed	<p>« <i>Le meilleur profil environnemental obtenu pour le bâtiment en bois (...)</i> »</p> <p>Existe-t-il un lien avec la phrase précédente? Dans cette AS, le scénario béton n’est pas modifié.</p>	Restructurer la discussion pour distinguer les idées avancées.	Oui, il existe un lien avec l’AS. Ce paragraphe a été restructuré afin de distinguer les différentes idées avancées	Fermé

67	Figure 22	Ge	Je comprends que vous voulez mettre en perspective l'impact relatif des matériaux, mais utiliser le volume comme base comparative n'est pas approprié pour l'objectif que vous souhaitez atteindre. Les valeurs au tableau 9 (ou tableau 24) sont présentées par kg. Il serait plus pertinent de présenter une comparaison par kg.	Présenter les chiffres par kg et non m <sup>3</sup> .	Excellent point, au regard d'une analyse critique des méthodes comparaisons des émissions de GES des matériaux, le paragraphe 4 de la section 8 a été réécrit comme suit : Les matériaux utilisés dans la construction des bâtiments présentent des émissions intrinsèques (mesurées en équivalents CO <sub>2</sub> ) différentes. Cependant il est important de souligner qu'une comparaison des émissions GES des matériaux sur une base de quantité (volume ou masse) est erronée, car ces matériaux ont des masses volumiques différentes. En effet, il serait plus approprié de faire une comparaison sur la base de la même unité fonctionnelle. Dans le cas des produits structuraux par exemple la portée (longueur ou hauteur en mètre) et la charge (kN/m) à supporter sont les deux paramètres à considérer pour une comparaison adéquate. Sur cette lancée, une analyse comparative des émissions de GES de la production d'une poutre (élément structural) à	Fermé

					partir des trois principaux matériaux utilisés en structure dans le bâtiment (bois, béton et acier) montre que les émissions GES de la poutre en bois sont 5 fois moins que celles de la poutre en béton et près de 7 fois moins les émissions de la poutre en acier (Cecobois, n.d).	
68	Section 8 – p. 57 – dernière phrase	Ge	Cette affirmation est inexacte, il existe aussi des émissions de procédé, particulièrement dans le cas de la production du ciment.	Revoir cette affirmation	Cette phrase a été modifiée comme suit : Les émissions liées à la production des matériaux et celles de la phase d’opération sont strictement liées aux sources d’énergie utilisées	Fermé
69	Section 8 – p. 58 – premier paragraphe	Ed	« (...) les émissions de GES proviennent de l’étape de production des matériaux »  Ajouter « proviennent en majorité »...	Modifier	Cette phrase a été modifiée dans la section 8.	Fermé
70	Section 9	Ge	« Les résultats permettent de cerner des enjeux et tirer des conclusions relatifs au code du bâtiment »  Je ne trouve pas que l’analyse a réellement abordé de façon satisfaisante cette question. Il faudrait mettre davantage en perspective les implications du code du	Revoir la section analyse ou revoir la pertinence de cette affirmation.	Cette affirmation a été enlevée de la section 9, car moins pertinente au regard des interprétations faites des résultats.	Fermé

			<p>bâtiment dans la section résultats.</p> <p>Une option serait de mettre les résultats en perspective avec ceux obtenus dans les études similaires ailleurs dans le monde.</p>			
71	Section 10	Te	<p>Dans le contexte d'une étude comparative entre des bâtiments béton et bois, il apparaît important de mentionner les limites de la méthode de prise en compte des émissions biogéniques et de la séquestration du carbone.</p>	<p><b>Je réalise que l'absence de documentation des hypothèses sur le carbone biogénique est problématique. Surtout si vous voulez aborder la question dans la section conclusion. Il faudrait minimalement discuter des hypothèses de prise en compte du carbone biogénique dans la méthode TRACI.</b></p>	<p>Les limites de la méthode utilisée dans la prise en compte des émissions du biogéniques et de la séquestration du carbone ont été mentionnées à la section 11 (Limites) comme suit :</p> <p>Le béton est un matériau de construction qui en fin de vie absorbe le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Cette capacité d'absorption est le résultat de la réaction chimique entre les composantes du ciment et le CO<sub>2</sub> atmosphérique (carbonatation). L'estimation des quantités de CO<sub>2</sub> absorbées est strictement fonction de l'aire (A) exposée à l'air des particules de béton. La grande incertitude autour de l'estimation de ce paramètre a été à l'origine de l'exclusion de la carbonatation du béton de l'étude. Cependant l'exclusion de l'étude de la capture, séquestration et stockage du carbone biogénique du bois permet renseigne sur la</p>	Fermé

					<p>cohérence et la consistance du modèle, car dans les deux cas, les enjeux autour du carbone biogénique ont été exclus de l'analyse. Toutefois, leur prise en compte dans le modèle demeure pertinente.</p> <p>Des explications ont été ajoutées sur le carbone biogénique (à la fin de la section 4.9.1.) et la carbonatation (section 4.5).</p>	
72	Section 10	Te	<p>La norme ISO demande de faire un rappel que : <i>LCIA results are relative expressions and do not predict impacts on category endpoints, the exceeding of thresholds, safety margins or risks</i></p>	<p>Ajouter la mention dans la section limite ou la section traitant des méthodes d'impact.</p>	<p>Cette mention a été ajoutée à la section 4.9 (méthodes d'analyse d'impacts)</p>	Fermé
73	Section 10	Ge	<p>Vous avez un choix très limité de catégories d'impact dans votre étude. Il serait préférable de rappeler au lecteur le champ limité des enjeux environnementaux couverts.</p>	<p>Ajouter une mention.</p>	<p>Les raisons du choix limité ont été mentionnées à la section 4.9 comme suit :</p> <p>Bien que la méthode TRACI présente un grand nombre d'indicateurs, le nombre d'indicateurs analysé dans cette étude est limité. Ceci en raison des objectifs de l'étude et du plan d'action gouvernemental dans lequel s'inscrit le présent projet de recherche. Axés sur les</p>	Fermé



					matériaux de construction et sur les émissions de GES, les indicateurs considérés sont ceux recommandés par la règle de catégorie de produit (Product Category Rules (PCR) en anglais) développé par FPInnovations pour l'industrie forestière (FPInnovations, 2018). Du fait que le plan d'action du gouvernement repose sur les changements climatique, un regard particulier a été porté à la catégorie d'impact changement climatique.	
74	Section 11	Ge	<p>L'ensemble du texte de cette section est une formulation très générale des avantages de la construction en bois qui sont mis de l'avant dans la littérature.</p> <p>Il serait préférable de formuler des recommandations beaucoup plus spécifiques qui sont directement liés aux observations faites dans cette étude.</p> <p>Aussi la formulation actuelle semble extrapoler les conclusions de cette étude à l'ensemble des systèmes</p>	<p>Ajouter des recommandations plus spécifiques à l'étude et éviter les extrapolations qui vont au-delà des objectifs et champ de cette étude.</p>	<p>Des recommandations spécifiques à l'étude ont été ajoutées comme mentionné ci-dessous :</p> <p>Au regard des résultats obtenus et des conclusions faites, l'empreinte carbone du cycle de vie du bâtiment en bois est plus faible comparativement à celle du bâtiment en béton. L'analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie a présenté l'étape de production des matériaux comme étant la plus importante contributrice aux émissions totales de GES. Cette contribution relative aux émissions totales des GES dans</p>	Fermé

			<p>constructifs en bois. Je ne pense pas que cette étude permet ce genre d'extrapolation.</p>		<p>chacun des bâtiments est au-delà de 60%. En effet, ce résultat met en évidence l'impact de la production des matériaux dans les émissions totales GES du cycle de vie d'un bâtiment. De ce fait, il est important que le gouvernement du Québec adopte des politiques qui encouragent l'utilisation des énergies propres (énergie à faible empreinte carbone) au détriment de l'énergie fossile dans l'industrie manufacturière. Cependant, les incitatifs à l'utilisation des technologies propres (technologies à faible émission GES), dans cette industrie manufacturière sont aussi un enjeu clé dans la réduction des émissions de GES de la production des matériaux de construction tout comme les politiques qui encouragent l'utilisation de matières recyclées dans les différents processus de fabrication de nouveaux produits. De fait, ce dernier point permettrait de réduire les émissions associées au module A1 (extraction de la ressource) de l'étape de production des</p>	
--	--	--	---	--	---	--

					matériaux.	
75	À ajouter	Te	Il manque dans cette étude une analyse de la qualité des données et de leur impact sur les résultats. À cela, il faut ajouter une analyse (ou une discussion) sur l'incertitude des résultats. Principalement, la question à répondre est : Est-ce que les différences que l'on observe pour les différents indicateurs sont significatifs?	Ajouter votre analyse de qualité des données et d'incertitude. Ajouter également une analyse de cohérence et complétude (voir section 4.5.3.2 et 4.5.3.4 dans ISO 14044)	Une section qualité des données et incertitudes a été ajoutée dans le rapport. L'analyse de cohérence et complétude est abordée dans l'évaluation de la qualité des données	Fermé

**Commentaires de la quatrième ronde de revue critique (version du rapport du 27 juin 2019)**

#	Page/Section/Paragraphe/figure/tableau	Type <sup>1</sup>	Commentaires du réviseur	Changement proposé	Réponse de l'auteur	Statut
76	Sommaire	Ge	« les impacts sur l'environnement (...) sont inférieurs comparés à ceux du bâtiment en béton, pour toutes les catégories d'impacts analysées. »  La section résultat indique plutôt que seulement le résultat pour les	Nuancer les conclusions	Ce paragraphe a été réécrit comme suit : Les résultats obtenus de la comparaison des profils environnementaux des deux bâtiments indiquent que les impacts sur l'environnement du cycle de vie complet du bâtiment en bois sont inférieurs comparés à ceux du bâtiment en béton. Ce faible profil environnemental se	Fermé

			changements climatiques est concluant.		vérifie pour toutes les catégories d'impacts analysées. Les différences relatives entre le bâtiment en bois et celui en béton varient de 22% à 6% en fonction de la catégorie d'impact considérée. Ces différences relatives sont non significatives à l'exception de la catégorie changement climatique au regard des seuils définis par Humbert et al., en 2013 (Humbert et al., 2013). En effet, pour cette catégorie, le bâtiment en bois génère 20% moins d'émission de GES que le bâtiment en béton/acier. Ceci se traduit en des émissions évitées de 1,8 kt éq. CO2 (Figure 1).	
77	Sommaire	Ed	Pour être auto-portant, il faudrait décrire dans le sommaire la nature des analyse de sensibilité dont les résultats sont présentés.	Ajouter les description des AS	Les paramètres sensibles ainsi que les justificatifs ont été ajoutés au sommaire pour contextualiser les résultats présentés.	Fermé
78	Section 5.3.1	Ed	« 1 949 tkm » Ce serait plutôt des ktkm	Corriger	ktkm	Fermé
79	Section 5.3.1 Dernière phrase	Ge	Remettre la dernière phrase qui a été enlevé, car sinon on ne comprend pas pourquoi c'est le double pour le bâtiment en béton. Faire référence aux explications de la section suivante.	Modifier	À la section 5.3.1, les phrases suivantes ont été ajoutées pour la considération double dans le cas du bâtiment en béton. L'estimation double de l'énergie de transport se base sur le fait que les chantiers de construction en béton ont une durée d'exécution	Fermé

					plus longue (deux fois) comparativement aux chantiers en bois d'ingénierie (Groupe AGECO 2018). En fait, cet écart est principalement causé par la durée de séchage des éléments structuraux (colonnes, poutres, dalles, murs de refend) et non structuraux en béton coulé sur place.	
80	Figure 9 (et les autres suivantes)	Ed	Est-ce que le score pour la catégorie destruction de la couche d'ozone est bien 1?	Mettre le bon nombre de chiffres significatifs.	À partir de la figure 9, toutes les données en valeurs absolues dans les tableaux ont deux décimales significatives. Elles ont été présentées en note scientifique pour harmoniser et uniformiser leur présentation.	Fermé
81	Figure 14	Te	Je n'arrive toujours pas à comprendre comment il est possible d'arriver à ces contributions. J'ai testé dans Simapro l'impact de 3808 tonnes de béton et j'arrive seulement à 1 340 000 kg CO <sub>2</sub> .  Est-ce que le transport est inclus dans ce schéma?  Aussi ce graphique n'a pas d'unité.	Revoir les calculs	Dans l'estimation des émissions GES du béton structural, la méthode d'analyse d'impact TRACI ainsi que le processus de production du béton 30-32 MPa de la base de données Écoinvent v 3.3 ont été utilisés. Pour un volume de 3808 m <sup>3</sup> , il en résulte 2 099 856 kg éq. CO <sub>2</sub>  Dans le cas de l'ACV réalisée par l'institut Athéna intitulée (A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Ready-Mixed Concrete Manufacture by NRMCA Members) pour le compte de « National Ready	Fermé

					<p>Mixed Concrete Association (NRMCA) » le béton de 27-34MPa peut émettre un max de 509,1 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton produit (voir tableau 9, page 28 de cette publication). Si on multiplie cette émission unitaire par 3808 m<sup>3</sup> de béton, les émissions totales sont 1 938 653 kg éq. CO<sub>2</sub>.</p> <p>À égal volume de béton structural, les émissions GES obtenues dans notre cas d'étude sont 8% plus élevées comparativement à celles de l'étude de l'institut Athéna. Cette différence est non significative selon Humbert et al., 2013</p> <p>L'unité (kg éq. CO<sub>2</sub>) a été ajoutée à la figure 14 sur l'axe horizontal.</p>	
82	Section 8, bas de la page 47	Ge	<p>« montre que le les émissions GES de la poutre en bois sont 5 fois moins que celles de la poutre en béton et près de 7 fois moins les émissions de la poutre en acier »</p> <p>Pourtant votre comparaison sur la structure n'arrive pas à cette conclusion. Cela démontre qu'une vision trop limitée autour d'une fonction ne reflète pas la réalité de l'ensemble d'un système</p>		<p>Cette partie du paragraphe a été réécrite</p>	Fermé

Revue critique

			constructif.			
83	Section 9 – 2 <sup>ème</sup> paragraphe	Ge	« Ceci se vérifie pour toutes les cinq (5) catégories d’impacts analysées »  La section résultat indique plutôt que seulement le résultat pour les changements climatiques est concluant.	Nuancer les conclusions	Les conclusions ont été nuancées.	Fermé



[info@fpinnovations.ca](mailto:info@fpinnovations.ca)  
[www.fpinnovations.ca](http://www.fpinnovations.ca)

## NOS BUREAUX

**Pointe-Claire**  
570, boul. Saint-Jean  
Pointe-Claire (Qc)  
Canada H9R 3J9  
(514) 630-4100

**Vancouver**  
2665, East Mall  
Vancouver (C.-B.)  
Canada V6T 1Z4  
(604) 224-3221

**Québec**  
1055, rue du P.E.P.S.  
Québec (Qc)  
Canada G1V 4C7  
(418) 659-2647