

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

MODÉLISATION DE L'INFLUENCE DE LA SÉLECTION DES MATÉRIAUX SUR LE
PROFIL ENVIRONNEMENTAL DU CYCLE DE VIE D'UN BÂTIMENT À BUREAUX :
ÉVALUATION CRITIQUE DE LEED V4

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Yannick LESSARD

Jury : M. Mourad Ben AMOR, Ph. D., membre et directeur de recherche
M. Pierre BLANCHET, Ph. D., membre et codirecteur de recherche
Mme Caroline FRENETTE, Ph. D., membre et codirectrice de recherche
M. Dominique Lefebvre, M. Sc. A, membre interne
M. Bruno Gagnon, Ph. D., membre externe

DÉDICACE

À Yvan et Thérèse

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M. Ben Amor pour l'appui et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ma maîtrise. Je remercie également M. Pierre Blanchet pour mon intégration à sa Chaire Industrielle de Recherche en Construction ÉcoResponsable en Bois (CIRCERB) et son appui financier m'ayant permis de participer à leurs diverses activités et à des événements sortant du cadre de ma maîtrise. Merci aussi à Mme Caroline Frenette pour son support lors de la réalisation de ma maîtrise.

J'aimerais aussi remercier Provencher Roy pour son support autant financier que matériel et technique. Plus précisément, je remercie M. Claude Bourbeau de m'avoir permis d'intégrer son équipe de développement durable à leur bureau pendant une période de quatre mois. Merci aussi à toute l'équipe de développement durable, particulièrement à Mme Céline C. Mertenat, pour son support et son aide pour la réalisation de mon projet et de m'avoir permis de participer avec eux à quelques activités portant sur le bâtiment durable.

Merci à toute l'équipe du CIRCERB, incluant l'ensemble des partenaires industriels, pour son dynamisme et son soutien. Un merci à Mme Guylaine Bélanger et Mme Natalie Noël pour leur bonne humeur et leur serviabilité au sein du CIRCERB. Elles ont grandement facilité mes communications et mon intégration au CIRCERB. Je veux aussi remercier l'équipe du Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Ingénierie Durable et en Écoconception (LIRIDE) pour son bon esprit d'équipe et son entraide qui a facilité ma dernière année de maîtrise. Merci particulièrement à Chirjiv Anand pour son aide et sa patience lors de la rédaction de mon article.

Enfin, je remercie toute ma famille et mes amis proches qui m'ont permis de me ressourcer à tout moment durant mes études. Un remerciement tout particulier à Marie-Ève pour son soutien, son écoute et ses encouragements tout au long de mes études.

Finalement, merci aux partenaires qui ont participé au financement de mon projet : Provencher Roy, le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et le CIRCERB. Merci aussi au Centre de Recherche sur les Matériaux Renouvelables (CRMR) et au Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke d'avoir participé au financement de mon projet de recherche par l'octroi de bourses d'études supplémentaires.

RÉSUMÉ

Le secteur du bâtiment contribue grandement aux impacts environnementaux occasionnés par les activités anthropiques. Pour tenter de réduire ces impacts, divers systèmes de certification pour le bâtiment ont été développés. Toutefois, ces certifications ont tendance à se concentrer principalement sur la consommation énergétique durant la phase d'exploitation du bâtiment. Par conséquent, leur application pour un bâtiment qui consomme de l'énergie occasionnant de faibles impacts sur l'environnement peut parfois mener à des effets indésirables sur les impacts environnementaux des bâtiments. Tandis que certaines certifications ne se concentrent que sur quelques aspects du bâtiment, comme Passive House qui est axé principalement sur la consommation énergétique, d'autres, comme LEED v4, qui est la plus présente en Amérique du Nord, ont une portée plus large. Néanmoins, LEED v4 accorde une plus grande importance à la consommation énergétique qu'à la sélection de matériaux.

Basé sur une étude d'un bâtiment à bureaux situé au Québec (Canada), l'objectif de ce projet de recherche est de comparer les effets des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment en fonction de la considération de ces matériaux dans LEED v4. Ici, le terme *matériaux* est utilisé à des fins de simplification et signifie *matériaux de construction utilisés pour construire le bâtiment*. Les effets des matériaux sont évalués en analysant la contribution de ces derniers aux impacts environnementaux du bâtiment à l'étude ainsi qu'en déterminant leur potentiel de faire varier ces impacts par le changement de certaines configurations de matériaux de ce bâtiment.

Les impacts environnementaux sont évalués par une analyse du cycle de vie (ACV) attributionnelle à l'aide du logiciel SimaPro 8.2, la base de données ecoinvent 3.1 et la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) IMPACT 2002+. Les résultats montrent que les matériaux contribuent de façon importante aux impacts environnementaux du bâtiment (> 50 %) et que la sélection de différentes configurations alternatives de matériaux peut faire varier considérablement ces impacts (de 0 % à plus de 50 %). Par ces résultats, il est montré que LEED v4 ne semble pas bien capturer ces effets des matériaux sur les impacts environnementaux sur le cycle de vie des bâtiments par son système de pointage dans le cas où le bâtiment consomme exclusivement de l'énergie provenant du réseau électrique du Québec (où l'électricité produite est principalement de source hydraulique). Effectivement, le pointage

accordé aux matériaux dans LEED v4 est de 13 points (ou 30 %) en comparaison à la consommation énergétique, qui est de 33 points (ou 70 %).

Les résultats de ce projet de recherche permettent donc d'amener les diverses parties prenantes du secteur de la construction vers une réflexion plus éclairée sur le rôle à jouer de la sélection des matériaux et des certifications dans l'amélioration environnementale des bâtiments dans le cas où l'énergie consommée par les bâtiments occasionne de faibles impacts sur l'environnement, ainsi que sur la complémentarité de l'ACV avec les certifications.

Mots clés : Bâtiments, Matériaux de structures et d'enveloppe, Analyse du cycle de vie, Certification, Impacts environnementaux

ABSTRACT

Buildings being one of the highest contributors to environmental impacts globally, various Green Building Rating Systems (GBRS) have been proposed in support to reduce their impacts. Primarily oriented towards energy consumption from use stage, their application in low impact energy contexts can result in some undesirable side effects. While some GBRS focus only on few aspects of the building, like Passive House, others like LEED v4, the most present in North America, have a broader scope. However, this GBRS grants more importance to energy consumption than material selection.

Based on a office building case study in Quebec (Canada), the aim of this study is to compare the material effects on building LCA impacts and their considerations in LEED v4. Here, the term *material* is used, for simplicity purpose, to mean *construction material used to build the building*. Thus, the material effects can be reflected by the material contribution on building LCA impact and their potential to vary these impacts from the adoption of different material configurations.

The environmental impacts are evaluated using the attributional LCA approach with SimaPro 8.2 software, ecoinvent 3.1 database and IMPACT 2002+ method. Building LCA results indicate the high environmental impact contribution from materials (> 50 %) and their good potential to vary LCA impacts (0 % to more than 50 %). By comparison, the LEED v4 rating system did not seem to be as effective in capturing the effects of materials in low impact energy context like the one of Quebec (where the electricity generation is hydro-based). As a matter of fact, material selection represents 13 points (or 30%) by comparison with 33 points (or 70%) for energy consumption.

Conclusions drawn from this research project will help stakeholders from the building sector in their efforts to improve building environmental profiles providing answers about the implication of material selection and GBRS to this end and the complementarity between LCA and GBRS.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Analyse du cycle de vie : outil d'évaluation environnementale holistique	5
1.1.1 Méthodologie générale	5
1.1.2 Approches attributionnelle et conséquentielle	7
1.1.3 Bases de données	8
1.1.4 Méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV)	9
1.2 ACV des bâtiments	11
1.2.1 Impacts environnementaux des bâtiments	13
1.2.2 Points chauds des impacts des bâtiments : Question de contexte	13
1.2.3 Effet de la sélection des matériaux	15
1.3 Systèmes de certification pour le bâtiment	17
1.3.1 LEED	18
1.3.2 Effets de LEED sur les impacts environnementaux des bâtiments	19
CHAPITRE 2. OBJECTIFS ET SOMMAIRE DE LA MÉTHODOLOGIE	23
2.1 Problématique de recherche	23
2.2 Objectifs de recherche	23
2.2.1 Objectif principal	23
2.2.2 Objectifs spécifiques	23
2.3 Sommaire de la méthodologie	24
2.3.1 Informations supplémentaires du scénario de base	24
2.3.2 Informations supplémentaires des scénarios alternatifs	26
2.3.3 Calcul relatif à l'inventaire des éléments constituant le bâtiment	26

2.3.4	<i>Limites des matériaux considérés</i>	27
CHAPITRE 3.	LEED V4: WHERE ARE WE NOW? CRITICAL ASSESSMENT THROUGH THE LCA OF AN OFFICE BUILDING USING A LOW IMPACT ENERGY CONSUMPTION MIX	28
3.1	Avant-propos	28
3.2	Abstract (<i>début de l'article</i>)	30
3.3	Introduction	30
3.4	Methodology	33
3.4.1	<i>LCA of the base case scenario</i>	34
3.4.2	<i>Scenario Evaluation</i>	37
3.4.3	<i>Critical assessment of LEED v4</i>	38
3.5	Results and discussion	40
3.5.1	<i>LCA results of the base case scenario</i>	40
3.5.2	<i>Results of other scenario evaluations</i>	42
3.5.3	<i>Critical assessment of LEED v4</i>	44
3.6	Conclusions	46
3.7	Acknowledgements	48
3.8	About the Authors.	48
CHAPITRE 4.	DISCUSSION GÉNÉRALE	49
4.1	Informations complémentaires	49
4.2	Limites et recommandations	49
4.2.1	<i>Inventaire</i>	50
4.2.2	<i>Durée de vie du bâtiment</i>	52
4.2.3	<i>Consommation énergétique</i>	53
4.2.4	<i>Analyse des incertitudes</i>	54

<i>4.2.5 Choix méthodologique concernant l'ACV réalisée</i>	55
<i>4.2.6 Évaluation du système de pointage de LEED v4</i>	56
<i>4.2.7 Évaluer d'autres certifications</i>	57
CHAPITRE 5. CONTRIBUTIONS DU PROJET DE RECHERCHE.....	59
CONCLUSION	63
BIBLIOGRAPHIE	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Quantité d'énergie consommée (en PJ) par les bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec en 2013 en fonction des sources d'énergie disponibles et de leur utilisation dans les bâtiments* [51]	14
Tableau 1.2 Niveaux de la certification LEED v4 et leurs pointages associés	19
Tableau 2.1 Formules utilisées pour calculer l'inventaire des données primaires.....	27
Tableau 3.1 Comparison between the base case scenario (S0) and the 6 hypothetical scenarios (S1-S6).....	37
Tableau 3.2 Comparison of IMPACT 2002+ midpoint categories with LEED v4 option 4 categories requirement [17,71].....	39
Tableau 3.3 Comparison between building material LCA contributions and MR LEED v4 contribution. Impacts and points variations were also evaluated for all scenarios.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Cadre d'une ACV selon ISO 14 040 [13].....	6
Figure 1.2 Structure générale de la méthode d'EICV IMPACT 2002+ (inspirée de Jolliet et al. (2010) [17])	10
Figure 1.3 Structure générale de la méthode d'EICV TRACI (inspirée de U.S. EPA (2014) [32,33]).....	10
Figure 1.4 Cycle de vie d'un bâtiment (adapté de Cecobois (2015) [39]).....	12
Figure 2.1 Schéma du bâtiment à l'étude (scénario de base) (Provencher Roy, 2009)	25
Figure 3.1 LEED v4 BD+C: New Construction rating system. A) Points allocated to each category and their contribution to the total available points (110); B) Optional and prerequisite credits corresponding to each LEED v4 category, and their respective contributions.....	32
Figure 3.2 Summary of the study's methodology	34
Figure 3.3 System boundary of the base case office building.....	35
Figure 3.4 Contribution analysis of the office building life cycle environmental impacts using the IMPACT 2002+ method. Part (A) refers to the contributions of the base case scenario life cycle stages and part (B) refers to the contributions of materials excluding the use stage. Midpoint categories are: Global warming (GW), Ozone layer depletion (OZO), Respiratory organics (RESP-O), Terrestrial acidification and nitrification (T-ACI/EUT), Aquatic acidification (A-ACI), Aquatic eutrophication (A-EUT), Non-renewable energy (ENER), Carcinogens (CARC), Non-carcinogens (N-CARC), Respiratory inorganics (RESP-I), Ionizing radiation (RAD), Aquatic ecotoxicity (A-ECO), Terrestrial ecotoxicity (T-ECO), Land occupation (OCC) and Mineral extraction (MIN).....	41
Figure 3.5 Material effects on office building LCA impacts using the IMPACT 2002+ midpoint categories. A) The S0 row displays the contributions of energy consumption (in white) and materials (in black) in the building LCA impacts. B) Variations due to material changes from the base case scenario for the six scenarios. IMPACT 2002+ impact categories are divided into two parts: included (B.1) and not included (B.2) in LEED v4. The thresholds to obtain "Option 4. Building life cycle impact reduction" optional credit are defined by the	

first four quotations in the legend, an increase ($< 5\%$) is identified by the “1[+]” quotation and the minimum decrease ($< -10\%$), by the “2[-]” quotation..... 43

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse environnementale du cycle de vie
ACV-A	ACV attributionnelle
ACV-C	ACV conséquentielle
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
DEP	Déclaration environnementale de produit
EICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
GBRS	Green building rating systems (pour <i>Systèmes d'évaluation des bâtiments durables</i>)
HQE	Haute qualité environnementale (HQE)
ISO	Organisation internationale de normalisation
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
O.S.	Objectif spécifique
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
SETAC	Société de toxicologie et chimie environnementales
USGBC	U.S. Green Building Council

LISTE DES ANNEXES

Annexe A – Informations sur les GBRS

Annexe B – Informations supplémentaires sur les données de l’inventaire du bâtiment

Annexe C – *LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment Through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix. (Supplementary information)*

Annexe D – Analyses complémentaires relatives à l’ACV

Annexe E – Pistes d’éléments clés de LEED v4

Introduction

Les bâtiments sont responsables d'une portion considérable des impacts environnementaux occasionnés par les activités anthropiques [1]. Par exemple, les bâtiments résidentiels et commerciaux génèrent à eux seuls près de 35 % des rejets de gaz à effet de serre au Canada [2]. À la suite d'une prise de conscience de l'importance de la contribution du secteur du bâtiment à ces impacts au début des années 1990, un changement de paradigme s'est amorcé pour orienter les pratiques de ce secteur vers des pratiques plus écoresponsables. Dans cette optique, plusieurs systèmes de certification pour le bâtiment se sont développés depuis le début des années 2000 [3,4], tels que *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM) du Royaume-Uni, *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) des États-Unis, Haute qualité environnementale (HQE) de France et Passive House de l'Allemagne. Ces certifications ont comme principal objectif d'orienter les différentes parties prenantes du secteur du bâtiment vers ces nouvelles pratiques. Toutefois, la majorité de ces certifications ont tendance à accorder, à différents égards, une plus grande importance à la consommation énergétique durant la phase d'exploitation du bâtiment [5,6]. Même si plusieurs études montrent que l'énergie consommée par le bâtiment génère la plus grande partie des impacts environnementaux sur son cycle de vie, quelques études ont démontré que ce n'est pas toujours le cas [7]. Les impacts environnementaux associés à la consommation énergétique du bâtiment dépendent de divers facteurs. Un des facteurs pouvant avoir une grande influence sur ces impacts est le type d'énergie consommée par le bâtiment [8]. Par exemple, dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement, tel que l'énergie provenant de sources renouvelables, la contribution de la consommation énergétique aux impacts environnementaux des bâtiments peut devenir plus faible que celle des matériaux. Ici, le terme *matériaux* est utilisé à des fins de simplification et signifie *matériaux de construction utilisés pour construire le bâtiment*. Ainsi, les matériaux peuvent contribuer plus significativement aux impacts des bâtiments dans ce cas [9,10]. Sachant que les certifications sont davantage orientées vers la consommation énergétique du bâtiment, il devient donc important de se questionner sur l'efficacité de l'application de ces certifications dans l'optique de réduire les

impacts environnementaux des bâtiments dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement.

Depuis le début des années 2000, l'analyse du cycle de vie (ACV) fait ses preuves dans le secteur du bâtiment au niveau mondial afin d'aider à identifier les points chauds du profil environnemental des bâtiments et d'éviter que les changements apportés à la conception du bâtiment n'occasionnent que de simples déplacements d'impacts. En effet, l'ACV permet d'évaluer, selon un cadre méthodologique bien défini, les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie, soit de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie d'un produit ou d'un service. Cet outil se présente dorénavant comme un incontournable qui devrait être intégré dès le début de la conception du bâtiment afin de mener globalement à une réduction significative et efficiente des impacts environnementaux des bâtiments. Certains critères par lesquels est demandée une évaluation, en partie ou en totalité, des impacts environnementaux par l'ACV sont maintenant intégrés à quelques systèmes de certification, tels BREEAM et LEED v4. Des exemples de cette intégration sont d'exiger d'utiliser des produits ayant une fiche de déclaration environnementale de produit (DEP), qui inclut une ACV, ou bien de comparer les résultats d'ACV de différents scénarios [11].

Malgré le grand nombre d'études évaluant les impacts environnementaux dans le secteur du bâtiment, il n'y a pas d'études qui ont été identifiées lors de la revue de la littérature qui évaluent à la fois les points chauds du profil environnemental des bâtiments, ces impacts en fonction d'une consommation énergétique du bâtiment occasionnant de faibles impacts sur l'environnement, la variation de ces impacts en fonction de la sélection de différents matériaux et la relation de ces impacts avec les exigences des certifications. Ce projet de recherche cherche par conséquent à aider à combler ce vide dans la littérature.

L'objectif principal de ce projet de recherche est de déterminer la relation entre le potentiel de la sélection des matériaux à influencer les impacts environnementaux d'un bâtiment dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement et la considération des matériaux dans le système de pointage de LEED v4.

Ce mémoire, en format *par article*, contient cinq chapitres. Le premier chapitre est une revue critique de la littérature qui permet de faire l'état de l'art relatif à la portée du projet de recherche. Les objectifs ainsi qu'un sommaire de la méthodologie utilisée pour ce projet de

recherche, et quelques informations complémentaires s'y rattachant, sont présentés au deuxième chapitre. La description détaillée de la méthodologie est présentée au troisième chapitre. Ce chapitre est constitué de l'article, précédé d'un avant-propos. Les résultats permettant de répondre aux objectifs du projet de recherche sont exposés et discutés dans cet article. Certains résultats et discussions complémentaires ainsi que certaines limitations et recommandations sont présentés au quatrième chapitre. La contribution des travaux réalisés est présentée au cinquième chapitre, qui est suivi d'une conclusion générale.

Chapitre 1. Revue critique de la littérature

Cette section présente la revue critique des travaux publiés en lien au projet de recherche.

1.1 Analyse du cycle de vie : outil d'évaluation environnementale holistique

La pensée du cycle de vie est apparue officiellement dans le secteur de la construction au commencement des années 1980 avec l'étude Bekker, qui se concentrait sur l'utilisation de ressources *renouvelables* (selon la terminologie de cette époque) [4]. Toutefois, ce n'est qu'à partir des années 1990 que l'analyse du cycle de vie (ACV) a commencé réellement à être utilisée dans ce secteur [12]. Un développement méthodologique plus approfondi de l'ACV par la Société de toxicologie et chimie environnementales (SETAC) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a débuté dans les années 1990, incluant l'aspect normatif par l'Organisation internationale de normalisation (ISO). La publication de la première édition de la série des normes ISO 14040 en 1997 a ensuite permis de définir un cadre méthodologique général de l'ACV, standardisant ainsi les procédures de l'ACV. Dans cette série de normes, les étapes d'inventaire, d'évaluation de l'impact et d'interprétation sont détaillées dans ISO 14040 [13] et ISO 14044 [14], tandis que des exemples d'application sont présentés dans ISO 14047 [15] et 14049 [16]. Toutefois, ISO ne définit que la structure générale de l'ACV sans nécessairement préciser une technique spécifique pour calculer les impacts environnementaux. Par conséquent, des conclusions différentes peuvent résulter d'une même ACV en fonction de la façon dont l'objectif de l'étude est défini et de la technique de calcul utilisée [4].

1.1.1 Méthodologie générale

L'ACV permet d'analyser selon une approche systémique les impacts environnementaux potentiels de l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un service en tenant en compte de leur fonctionnalité. Elle permet aussi d'éviter que les améliorations environnementales n'occasionnent que de simples déplacements des charges polluantes, soit d'une phase du cycle de vie à une autre ou d'une catégorie d'impact à une autre [17]. De plus, il est possible de comparer les résultats d'ACV de plusieurs produits ou systèmes, pourvu que leur(s) fonction(s) principale(s) et leur unité fonctionnelle soient identiques [17,18]. C'est donc pour

son grand potentiel que le secteur de la construction s'est intéressé graduellement à l'ACV, dont son utilisation dans ce secteur s'est accentuée au début des années 2000 [6,19].

Afin d'évaluer les impacts environnementaux du cycle de vie d'un produit ou d'un système, une démarche en quatre phases est définie par les normes ISO 14040 et ISO 14044 [13,14]. Cette démarche comprend 1) la définition des objectifs, 2) l'inventaire des émissions et des extractions, 3) l'analyse de l'impact et 4) l'interprétation (figure 1.1).

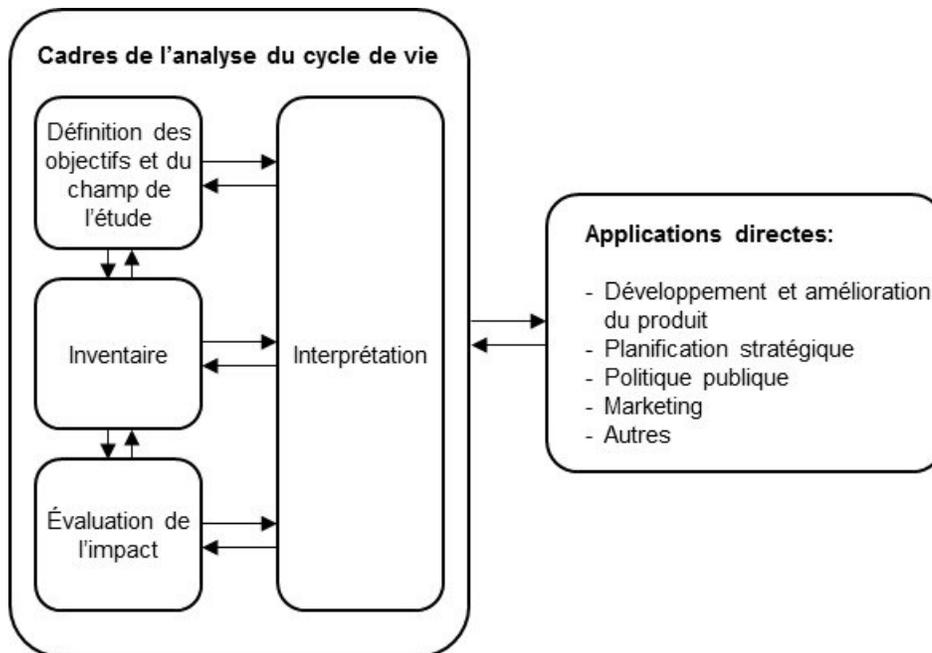


Figure 1.1 Cadre d'une ACV selon ISO 14 040 [13]

Ces phases se définissent de la manière suivante [13,14] :

- La **définition des objectifs et du système** permet de décrire l'étude ainsi que de définir les objectifs et le champ de l'étude. C'est lors de cette phase que les éléments cruciaux à l'étude sont définis, soit : la fonction du système, l'unité fonctionnelle, les flux de références et les limites du système. Cette phase définit donc autant les scénarios de base que les alternatives à étudier.
- L'**inventaire des émissions et des extractions** quantifie les émissions des polluants dans l'air, l'eau et le sol ainsi que les extractions des matières premières, qu'elles soient renouvelables ou non renouvelables. D'autres éléments pouvant jouer un rôle sur les impacts environnementaux, tels que l'utilisation des sols, peuvent aussi être déterminés dans cette phase.

- L'**évaluation de l'impact environnemental** (EICV) permet d'évaluer les émissions et les extractions inventoriées dans la phase précédente en fonction de leurs impacts sur l'environnement selon différents niveaux. Cette évaluation doit obligatoirement se faire selon les deux étapes suivantes :
 - la **classification** détermine la contribution de chacune des émissions aux différentes catégories d'impacts environnementaux évaluées (effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité, diminution des ressources, etc.) ;
 - la **caractérisation** attribue des facteurs de caractérisation aux émissions inventoriées afin de les convertir en une unité commune (indicateur) propre à chacune des catégories d'impacts. Cette caractérisation peut se faire en deux niveaux :
 - la **caractérisation intermédiaire** attribue des facteurs de caractérisation intermédiaires qui permettent d'évaluer l'importance relative des émissions aux différentes catégories d'impacts environnementaux ;
 - la **caractérisation des dommages** attribue des facteurs de caractérisation de dommage aux catégories d'impacts intermédiaires afin de permettre d'évaluer leur contribution aux différentes catégories de dommage. Ces catégories de dommage sont relatives à une aire de protection, telles que la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les changements climatiques, etc.

Certaines étapes supplémentaires peuvent aussi être effectuées, au besoin, telles que la normalisation, le regroupement et la pondération.

- L'**interprétation** consiste autant à interpréter des résultats obtenus dans les phases précédentes que d'évaluer la qualité et la robustesse des résultats (analyses de sensibilité, analyses des incertitudes, contrôles de qualité, etc.). Cette phase permet aussi d'identifier les points chauds et les options d'amélioration du produit étudié.

1.1.2 Approches attributionnelle et conséquentielle

L'ACV peut se faire selon deux différentes approches de modélisation : l'ACV attributionnelle (ACV-A) et l'ACV conséquentielle (ACV-C). L'ACV-A vise à décrire et à

mesurer les impacts environnementaux qui sont attribuables à un produit en considérant tous les processus élémentaires qui lui sont liés par des flux de matières et d'énergie. En ACV-A, les données d'inventaire sont des données qui ont été quantifiées par des mesurages, des estimations et des moyennes et qui ont été soumises à un certain processus d'allocation afin de déterminer les impacts environnementaux potentiels leur étant associés. L'ACV-C, quant à elle, vise à décrire et mesurer les conséquences environnementales suivant un ou plusieurs changements au système d'un ou plusieurs produits. Seulement les processus élémentaires pertinents dans l'évaluation des conséquences de ce ou ces changements sont considérés dans cette approche. Les relations entre ces processus et le système perturbé peuvent être autant d'ordres physiques (flux de matières et énergie) que purement économiques. En ACV-C, les données d'inventaire sont des données marginales qui représentent les effets d'un changement sur les impacts environnementaux potentiels d'un ou plusieurs produits [19–21].

1.1.3 Bases de données

Plusieurs organismes développent des bases de données en essayant de fournir des données les plus complètes et de meilleure qualité que possible malgré le défi de taille que cela implique. Parmi les plus populaires et les plus complètes, il y aecoinvent, GaBi Databases, Athena database et U.S. Life Cycle Inventory Database [3]. Malgré les efforts mis en place pour développer et améliorer ces bases de données, la disponibilité des données et leur qualité restent encore un enjeu important pour la réalisation des ACV et la crédibilité des résultats obtenus [22,23]. Même s'il est possible d'obtenir des estimations satisfaisantes à l'aide des bases de données actuellement disponibles, les incertitudes que peuvent comporter certaines données peuvent compromettre de façon significative la confiance au niveau de la prise de décision lors de l'interprétation des résultats [24]. Dans tous les cas, il est recommandé d'utiliser une base de données la plus complète possible ayant des données d'inventaire adaptées à la région spécifique et aux particularités du cas à l'étude. Il est aussi recommandé lorsqu'il est possible d'utiliser des données primaires pour les principaux processus contributeurs [21].

Après avoir comparé plusieurs bases de données actuellement disponibles, Martínez-Rocamora et al. (2016) [3] et Takano et al. [25] ont conclu qu'ecoinvent et GaBi sont les bases de données les plus complètes pour le secteur de la construction, dont ecoinvent est la plus

connue mondialement et actuellement la plus développée pour ce secteur. Bien qu'écrite soit une base de données développée initialement en Europe, plusieurs données de diverses provenances au niveau mondial y sont intégrées depuis l'arrivée de sa troisième version en 2013, telles que des données québécoises [26,27]. Due à ses meilleurs niveaux de cohérence et de transparence, l'utilisation de cette base de données permet d'obtenir une meilleure fiabilité des résultats d'ACV et peut facilement être intégrée au logiciel SimaPro, logiciel connu pour la réalisation des ACV. Outre SimaPro, plusieurs autres logiciels d'ACV sont aussi disponibles, tels que openLCA, GaBi, *Impact Estimator for Buildings* d'Athena, etc. [18,19,28,29].

1.1.4 Méthodes d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV)

Les impacts environnementaux sont évalués en fonction des voies d'impact associées aux émissions de contaminants sur le cycle de vie d'un produit. Les voies d'impact représentent l'ensemble des processus que les substances subissent lorsqu'elles sont relâchées dans l'environnement (changements de concentration, d'état et de milieu, transformation en une autre substance, etc.). Chaque contaminant peut mener à plusieurs impacts environnementaux différents. De plus, l'intensité des effets sur chacun des indicateurs environnementaux est propre aux différents types de contaminants. Afin de comptabiliser les impacts environnementaux, les méthodes d'EICV modélisent les flux de substances tirés de l'inventaire selon leurs différentes voies d'impact. À l'aide de facteurs de caractérisation, ces voies sont agrégées en différentes catégories intermédiaires (et de dommages), définies par un indicateur (c'est-à-dire une unité de référence) propre à chacune d'entre elles [17]. Plusieurs méthodes d'EICV sont disponibles, telles que TRACI, IMPACT 2002+, ReCiPe et IMPACT World+ [19].

Par exemple, IMPACT 2002+, développée en Europe par Pennington et al. (2005) [30,31], permet d'évaluer les impacts environnementaux selon deux niveaux : intermédiaires et de dommages. Les liens existants entre les 15 catégories intermédiaires et les quatre catégories de dommages d'IMPACT 2002+ sont illustrés à la figure 1.2.

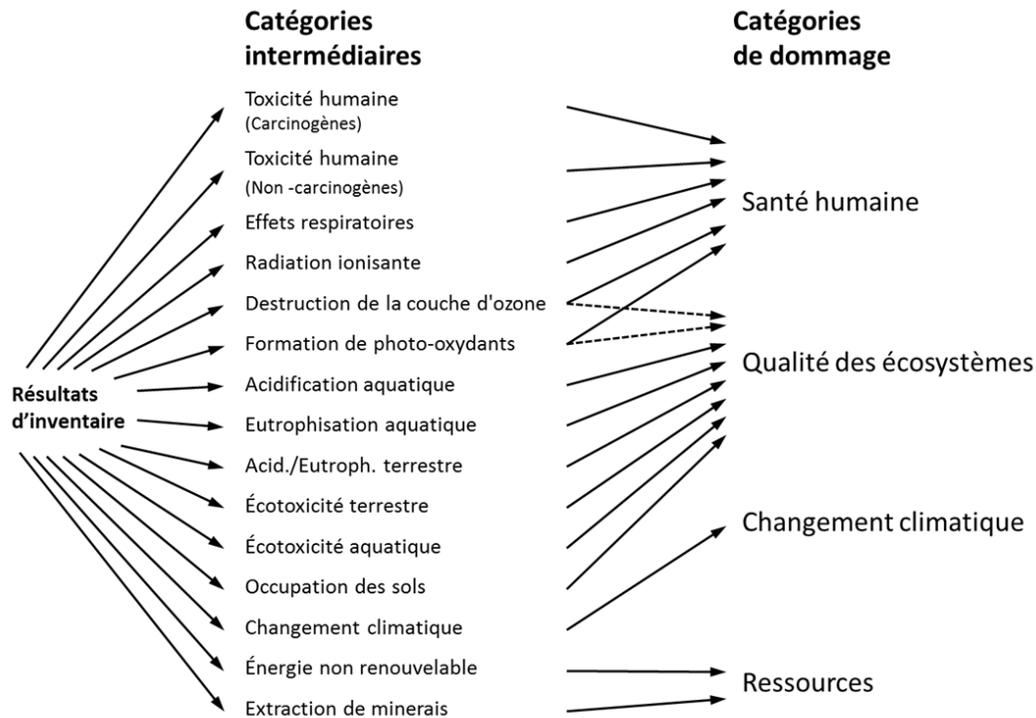


Figure 1.2 Structure générale de la méthode d'EICV IMPACT 2002+ (inspirée de Jolliet et al. (2010) [17])

Un autre exemple est TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) qui caractérise les impacts environnementaux potentiels pour le contexte géographique des États-Unis. Contrairement à IMPACT 2002+, TRACI ne permet d'évaluer les impacts que selon le niveau intermédiaire. La structure générale de cette méthode est illustrée à la figure 1.3.

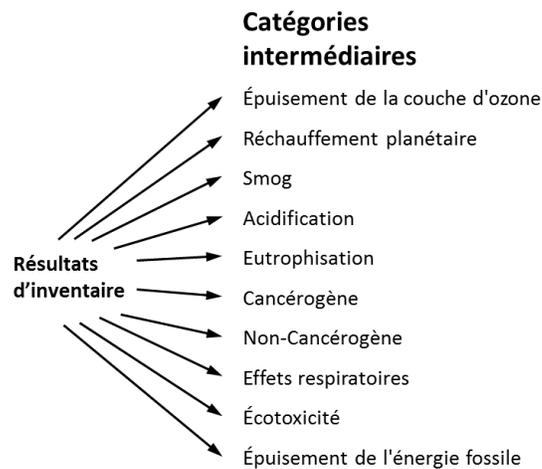


Figure 1.3 Structure générale de la méthode d'EICV TRACI (inspirée de U.S. EPA (2014) [32,33])

1.2 ACV des bâtiments

Les bâtiments sont des systèmes complexes à analyser [4,25,34,35]. L'ampleur des bâtiments, par tout ce qui les compose et les touche de près ou de loin, fait en sorte que de nombreux facteurs peuvent influencer leurs impacts environnementaux. Parmi ceux-ci, il est possible de compter :

- la diversité des matériaux qui les composent ;
- les méthodes variées de fabrication des matériaux, de construction, de réparation et de déconstruction ;
- les nombreuses fonctions des bâtiments et des matériaux les constituant;
- la complexité et le haut niveau d'incertitude relatif au mix énergétique que les bâtiments consomment lors de leur exploitation et des facteurs affectant la quantité d'énergie consommée tout au long de leur durée de vie ;
- ainsi que l'influence non négligeable du comportement des utilisateurs et des facteurs externes au bâtiment sur la durabilité des systèmes composant le bâtiment et sur sa performance énergétique et environnementale.

Malgré le nombre grandissant de recherches portant sur l'ACV dans l'industrie du bâtiment, il n'y a pas encore de définitions claires quant au choix, entre autres, de la méthodologie, des frontières du système, de l'unité fonctionnelle, de la durée de vie et des données d'inventaires afin de réaliser une ACV [7,34–36]. Il existe toutefois des guides et des normes, comme le EeBGuide [37] et la norme EN 15978 [38], dans lesquelles la définition et des indications sur certains de ces éléments sont données.

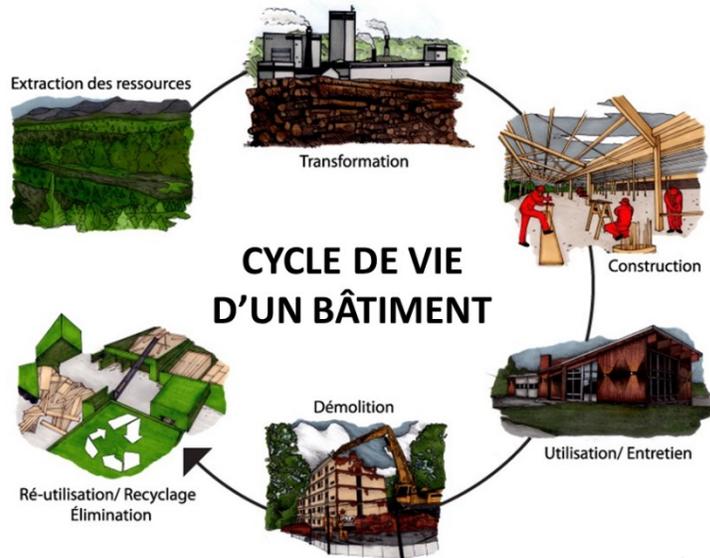


Figure 1.4 Cycle de vie d'un bâtiment (adapté de Cecobois (2015) [39])

Un bâtiment peut être évalué selon différents niveaux de détails et différentes approches. Il peut être évalué soit partiellement, c'est-à-dire seulement en n'évaluant que quelques éléments composant le bâtiment, soit de façon plus détaillée, c'est-à-dire en considérant l'ensemble du bâtiment [35,36,40]. Dans la littérature, pour considérer l'ensemble du bâtiment, certains auteurs se limitent au bâtiment en soi, tandis que d'autres considèrent différentes activités des utilisateurs, telles que leurs transports, leur consommation de ressources et leur génération de déchets associés à leurs diverses activités et à leurs comportements [41,42]. Aussi, les bâtiments peuvent être évalués :

- sur l'ensemble de leur cycle de vie (figure 1.4), soit :
 - du berceau au tombeau : c'est-à-dire l'évaluation de l'ensemble de leur cycle de vie, de l'extraction de la matière jusqu'à la fin de vie ;
 - du berceau au berceau : c'est-à-dire l'évaluation de l'ensemble de leur cycle de vie, de l'extraction de la matière jusqu'à la fin de vie, en considérant leur fin de vie comme source de matière première pour le cycle de vie du même produit (boucle fermée) ou d'un autre produit ou système (boucle ouverte) ;
- sur une partie de leur cycle de vie, soit :
 - du berceau à la porte : c'est-à-dire l'évaluation que d'une partie du cycle de vie en partant de l'extraction de la matière ;

- de la porte à la porte : c'est-à-dire l'évaluation d'une partie spécifique du cycle de vie [3,36,43].

De plus, certaines études se concentrent seulement sur quelques intrants ou catégories d'impacts tandis que d'autres essaient de couvrir un nombre d'intrants et de catégories d'impacts plus large [7]. Par exemple, l'analyse énergétique du cycle de vie permet de connaître l'impact environnemental en fonction seulement des intrants d'énergie, directs ou intrinsèques, sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit [44]. Il est toutefois conseillé de considérer le plus grand nombre possible d'intrants et de catégories d'impacts plutôt qu'un seul type d'intrant ou de catégorie. L'essence même de l'ACV est de montrer la vue d'ensemble et d'identifier les impacts significatifs associés à un produit ou à un procédé sur l'ensemble de son cycle de vie et des différentes catégories d'impacts [17].

1.2.1 Impacts environnementaux des bâtiments

Au niveau mondial, l'industrie de la construction, incluant les infrastructures et les bâtiments, consomme 60 % des matières premières extraites de la lithosphère, dont 40 % de celles-ci ne sont que pour le secteur du bâtiment [1]. Pour le Canada, les bâtiments résidentiels et commerciaux ont une empreinte environnementale d'un ordre d'importance similaire. Ils consomment 50 % des ressources naturelles extraites et 33 % de l'énergie et rejettent 25 % des déchets mis en décharge, 10 % des particules en suspension dans l'air et 35 % des gaz à effet de serre [2].

1.2.2 Points chauds des impacts des bâtiments : Question de contexte

La majorité des études réalisées jusqu'à présent conclut que la consommation énergétique durant la phase d'exploitation des bâtiments est le plus grand contributeur aux impacts environnementaux considérant l'ensemble de leur cycle de vie, soit entre 60 % et 90 % de la totalité de leurs impacts [4,6,41,42,45] et près de 85 % de leur énergie consommée [46]. L'importante contribution de la consommation énergétique est principalement due à la provenance de cette énergie, qui est généralement de sources fossiles dans plusieurs pays [6,47], et non seulement due à la quantité de l'énergie consommée [8,10,48]. Toutefois, certaines études ont démontré que certains contextes énergétiques, et par conséquent certains contextes géographiques, peuvent influencer considérablement les impacts environnementaux

associés à la consommation énergétique des bâtiments. En général, l'utilisation d'énergie de sources renouvelables, telle que l'hydroélectricité, peut réduire considérablement les impacts environnementaux de l'énergie consommée comparativement à l'utilisation d'énergie de sources non renouvelables [7–9]. Un exemple de ce type de contexte énergétique est celui du Québec. L'énergie du réseau électrique québécois est composée d'environ 99 % d'énergie renouvelable, dont 96 % sont d'origine hydraulique, et d'environ 1 % d'énergies fossiles et nucléaires provenant de l'importation des réseaux électriques avoisinants [49,50]. Selon la *Base de données nationale sur la consommation d'énergie* du gouvernement du Canada [51], dont les principales données sont présentées au tableau 1.1, 52 % de l'énergie consommée par les bâtiments commerciaux et institutionnels du Québec proviennent de ce réseau électrique, tandis que le reste provient majoritairement du gaz naturel (40 %). Du total d'énergie consommée par ces bâtiments, 56 % sont utilisés pour le chauffage des espaces et de l'eau domestique. De ces 56 %, plus de 80 % de l'énergie consommée à ces fins sont d'origines fossiles. Autrement dit, peu de bâtiments commerciaux et institutionnels utilisent l'électricité comme source d'énergie pour le chauffage des espaces et de l'eau domestique au Québec.

Tableau 1.1 Quantité d'énergie consommée (en PJ) par les bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec en 2013 en fonction des sources d'énergie disponibles et de leur utilisation dans les bâtiments* [51]

Utilisation Sources d'énergie	Chauffage des locaux	Chauffage de l'eau	Équipement auxiliaire	Moteurs auxiliaires	Climatisation	Éclairage	TOTAL
Électricité	14.2 17.6 % (↓) 16.8 % (→)	1.1 10.0 % (↓) 1.3 % (→)	24.9 91.9 % (↓) 29.4 % (→)	14.2 100.0 % (↓) 16.8 % (→)	8.3 94.1 % (↓) 9.8 % (→)	21.9 100 % (↓) 25.9 % (→)	84.6 51.8 % (↓) 100 % (→)
Gaz naturel	58.5 72.6 % (↓) 89.0 % (→)	5.7 53.3 % (↓) 8.7 % (→)	0.9 3.5 % (↓) 1.4 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.5 5.9 % (↓) 0.8 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	65.7 40.2 % (↓) 100 % (→)
Mazouts légers et kérosène	4.2 5.3 % (↓) 59.2 % (→)	2.9 27.1 % (↓) 40.8 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	7.2 4.4 % (↓) 100 % (→)
Mazouts lourds	0.3 0.4 % (↓) 63.7 % (→)	0.2 1.8 % (↓) 36.3 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.5 0.3 % (↓) 100 % (→)
Vapeur	0.0 0.1 % (↓) 100 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 100 % (→)
Autres**	3.3 4.1 % (↓) 61.2 % (→)	0.8 7.8 % (↓) 15.5 % (→)	1.3 4.6 % (↓) 23.3 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	0.0 0.0 % (↓) 0.0 % (→)	5.4 3.3 % (↓) 100 % (→)
TOTAL	80.6 100 % (↓) 49.3 % (→)	10.8 100 % (↓) 6.6 % (→)	27.1 100 % (↓) 16.6 % (→)	14.2 100 % (↓) 8.7 % (→)	8.8 100 % (↓) 5.4 % (→)	21.9 100 % (↓) 13.4 % (→)	163.4 100 % (↓) 100 % (→)

* 1^{er} ligne - Résultats en PJ, 2^e ligne - Contribution selon l'utilisation (↓), 3^e ligne - Contribution selon la source d'énergie (→)

**Inclut le charbon et le propane

Dans le cas où le bâtiment consomme exclusivement de l'énergie occasionnant de faibles impacts sur l'environnement, comme c'est le cas des bâtiments n'étant alimentés que par le réseau d'Hydro-Québec par exemple, la contribution des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments peut devenir beaucoup plus importante [8,10,52]. Cette situation peut aussi survenir lorsque le bâtiment a une très faible consommation énergétique, comme c'est le cas, par exemple, des bâtiments conçus en suivant les principes des bâtiments à énergie zéro (mieux connu sous son nom anglais, *Net Zero Building*) [53] ou bien des maisons passives [54].

Dans le cas où seulement les matériaux sont considérés [47,55,56] ou dans le cas de l'évaluation des bâtiments à énergie zéro [47,53], les matériaux contribuant majoritairement aux impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment sont généralement ceux relatifs à la structure principale et à l'enveloppe (principalement des murs extérieurs). Selon ces études, lorsque la structure principale d'un bâtiment est en béton armé, c'est souvent cette partie du bâtiment qui est le principal point chaud [40].

1.2.3 Effet de la sélection des matériaux

La majorité des études qui accordent une plus grande importance aux matériaux dans leurs analyses évaluent leurs impacts en fonction de seulement quelques indicateurs, soit principalement leur énergie intrinsèque et leurs émissions de gaz à effet de serre [6,7]. Par exemple, Takano et al. (2015b) [52] et Kofoworola et Gheewala (2009) [57] ont étudié les impacts environnementaux des matériaux sur le cycle de vie des bâtiments en fonction de leur bilan énergétique. Ils ont démontré qu'il peut y avoir un bénéfice énergétique significatif sur le cycle de vie du bâtiment si certains matériaux sont recyclés à leur fin de vie, malgré la dominance de l'impact de l'énergie consommée lors de la phase d'exploitation. Takano et al. (2015) [22] et Fouquet et al. [58] ont évalué les impacts environnementaux des matériaux en bois en prenant en compte le carbone biogénique séquestré dans le bois par un bilan carbone sur le cycle de vie d'un bâtiment. Ils ont démontré l'importance de considérer la séquestration du carbone dans les produits de bois pour l'évaluation des impacts concernant la catégorie du changement climatique afin de bien prendre en compte l'ensemble du cycle de vie de ces produits. D'autres ont simplement comparé différents matériaux selon leur cycle de vie (berceau à la porte ou berceau au tombeau) séparément de l'ensemble du bâtiment [1,59–61].

Jusqu'à présent, il n'y a que très peu d'études qui évaluent, à l'aide d'ACV plus complètes, l'effet de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. Selon ces études, les matériaux peuvent avoir deux effets principaux sur les impacts environnementaux des bâtiments :

- 1) *Effets indirects*, qui sont relatifs au changement de l'efficacité et de la consommation énergétique du bâtiment. Ils surviennent davantage dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment a un impact important sur l'environnement [42,62,63] ;
- 2) *Effets directs*, sur les impacts environnementaux du bâtiment par la variation directe de ces impacts occasionnée par la sélection de différents matériaux. Ces effets sont plus importants dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts environnementaux ou en fonction d'un bâtiment à faible consommation énergétique [48].

Il est à noter que, parmi les études qui ont été identifiées lors de la revue de la littérature, aucune n'a évalué les effets directs de la sélection de matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments consommant de l'énergie occasionnant de faibles impacts environnementaux, et ce, en considérant plusieurs indicateurs environnementaux actuellement utilisés par les méthodes d'EICV, comme IMPACT 2002+, RECIPE, etc. Toutefois, une étude se rapprochant d'une telle évaluation a été identifiée, soit celle réalisée par Quantis pour l'État de l'Oregon aux États-Unis [45], qui se base sur une étude d'un bâtiment résidentiel situé dans cet état. Il a été montré par les résultats d'ACV de ce bâtiment que le point chaud de ses impacts environnementaux était la consommation énergétique due à la source non renouvelable de l'énergie consommée. Ensuite, 25 pratiques permettant de réduire la génération de déchets de construction dans le secteur du bâtiment résidentiel ont été évaluées en fonction des bénéfices environnementaux qu'il pouvait en résulter. Malgré que l'objectif de ce projet ne fût pas nécessairement d'évaluer l'effet de la sélection de matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment, il est possible de constater en analysant les résultats obtenus que certaines de ces pratiques, principalement celles associées à la sélection de matériaux, peuvent potentiellement influencer ces impacts environnementaux. Cette observation est d'autant plus vraie si ces résultats sont relativisés en considérant le cas où l'énergie consommée par les bâtiments occasionne de

faibles impacts sur l'environnement. Par contre, ces conclusions sont basées seulement sur les résultats de la catégorie d'impact sur les changements climatiques.

1.3 Systèmes de certification pour le bâtiment

Plusieurs efforts ont été déployés afin d'améliorer les standards de l'industrie et les différents codes dans le secteur du bâtiment à travers le monde dans l'optique de réduire les impacts environnementaux relatifs aux bâtiments. Par ce mouvement, plusieurs outils et certifications ont été développés, tels que les systèmes d'évaluation pour les bâtiments écologiques (GBRS, du terme anglophone *Green Building Rating Systems*). Les GBRS peuvent s'orienter sur divers indicateurs environnementaux et aspects du bâtiment, tels que la consommation et l'efficacité énergétique, les matériaux, la consommation d'eau, la qualité des environnements intérieurs, la localisation, l'entretien, etc. Ces indicateurs peuvent être considérés sur une partie ou bien sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment [35,64,65].

Généralement, les GBRS accordent une plus grande importance à l'efficacité énergétique des bâtiments [5,6]. Ceci peut être expliqué par les impacts environnementaux élevés typiquement associés à la consommation énergétique durant la phase d'exploitation des bâtiments. Bien que les matériaux jouent un rôle plus important dans l'optique de diminuer les impacts environnementaux des bâtiments, selon des *effets directs*, dans certains cas où l'énergie consommée par les bâtiments occasionne de faibles impacts sur l'environnement, ils sont souvent sous-considérés dans les GBRS [53].

Nombreux GBRS sont actuellement disponibles à travers le monde. Pour ne nommer que ceux-là, il y a *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM) du Royaume-Uni, *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) des États-Unis, SBTool par l'*International Initiative for a Sustainable Built Environment* (iiSBE), CASBEE du Japon, *Green Star* de l'Australie, *Passive House* de l'Allemagne, Haute qualité environnementale (HQE) de France et *Living Building Challenge* (LBC) des États-Unis. Quelques détails sur chacun de ces GBRS sont présentés à l'annexe A. Parmi ces derniers, BREEAM et LEED sont les plus utilisés à travers le monde et influencent grandement le développement des autres GBRS [66].

1.3.1 LEED

Le GBRS sélectionné dans le cadre du présent projet de recherche est LEED. LEED est le système de certification qui a actuellement la plus grande croissance à l'international et compte actuellement plus de 54 000 projets, qui représentent approximativement 10.1 milliards de mètres carrés de surface construite dans plus de 132 pays [66,67]. En Amérique du Nord, LEED est la certification la plus active. Au Canada, plus de 1000 bâtiments sont certifiés LEED et 4000 bâtiments sont inscrits à la certification [68].

Cette certification a été développée par le *U.S. Green Building Council* (USGBC) à la fin des années 1990. La vision de cette certification est de devenir un standard des meilleures pratiques pour la conception, la construction, l'exploitation et la maintenance des bâtiments à travers le monde. C'est pourquoi le USGBC cherche à ce que chaque version surpasse les exigences de la précédente, comme c'est le cas avec la dernière version, soit LEED v4 [69,70]. Cette version est sélectionnée dans le cadre du présent projet de recherche. Actuellement, peu d'études portent sur cette version de la certification, car ce n'est qu'en octobre 2016 que la version actuelle de LEED, soit LEED 2009 (la troisième version), laissera place officiellement à la nouvelle version [69]. LEED v4 est toutefois disponible depuis la fin de 2013 [11].

LEED v4 couvre 21 secteurs différents du bâtiment, qu'ils soient existants ou nouveaux, dont les immeubles à bureaux, les écoles, les hôpitaux, les immeubles résidentiels, les entrepôts et les centres de distribution et les centres de données. Son système de pointage est composé de prérequis et de crédits optionnels répartis dans neuf catégories représentant différentes sphères du bâtiment (figure 3.1) [71]. Au total, 110 points sont ainsi répartis sur plus d'une quarantaine de crédits optionnels. Plus de détails sur le pointage de LEED v4 sont présentés à l'annexe A. Une fois les différentes conditions préalables et les prérequis respectés, la certification peut être obtenue en fonction de quatre différents niveaux (tableau 1.1) qui dépendent des points récoltés par l'atteinte des exigences d'un certain nombre de crédits optionnels [72]. Il est à noter que l'obtention de la certification se base sur les informations obtenues avant l'exploitation du bâtiment, soit selon les données obtenues lors de la conception et de la construction du bâtiment. La performance des systèmes lors de l'exploitation du bâtiment n'est donc pas évaluée et n'a pas d'incidence sur l'obtention de la certification.

Tableau 1.2 Niveaux de la certification LEED v4 et leurs pointages associés

Niveaux de la certification	Pointage
Certifié	40-49
Argent	50-59
Or	60-79
Platine	80 et +
Total	110

1.3.2 Effets de LEED sur les impacts environnementaux des bâtiments

Quelques études ont évalué les effets de LEED sur les impacts environnementaux des bâtiments. Peu d'études concernent la nouvelle version (LEED v4), bien que sa documentation soit actuellement disponible depuis 2013. Ceci peut s'expliquer par le fait que cette version n'est entrée officiellement en vigueur qu'en octobre dernier, comme il a été mentionné précédemment. Ceci étant dit, davantage d'études portent sur LEED 2009 et les versions précédentes. De façon générale, il a été démontré que la certification LEED permet de réduire les impacts environnementaux des bâtiments. Cette réduction se fait souvent par le biais de la consommation énergétique. Cette consommation énergétique peut être modifiée par l'atteinte de crédits optionnels associés, soit à l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes mécaniques ou par l'utilisation d'énergie provenant de sources d'énergie moins polluantes [9,73], soit de façon plus indirecte par la sélection de différentes configurations de matériaux augmentant l'efficacité énergétique du bâtiment [34,74].

Il a été démontré que le potentiel de réduction des impacts environnementaux des bâtiments par l'application de LEED n'est pas uniforme et peut faire varier considérablement. Cela peut dépendre des crédits optionnels impliqués pour atteindre un certain niveau de certification, du type de bâtiment et de la source de l'énergie consommée par le bâtiment. En fait, la quantité de points obtenus par l'atteinte d'un certain nombre de crédits optionnels n'est pas nécessairement en corrélation avec la réduction des impacts environnementaux pouvant en résulter [5,9,65,73,75]. Scheuer and Keoleian (2002) [76] ont été les premiers à montrer cette ambiguïté entre LEED v2 et ses effets sur les impacts environnementaux des bâtiments. Humbert et al. (2007) [75] ont proposé de reconfigurer le pointage accordé à chacun des crédits optionnels de LEED v2.1 en fonction des effets de leurs exigences sur les impacts environnementaux d'un édifice à bureaux, d'une école et d'un bâtiment résidentiel situés en

Californie. Par cet exercice, ils ont montré que la certification pouvait avoir des effets grandement variables sur les impacts des bâtiments et que ces effets n'étaient pas nécessairement corrélés avec le pointage LEED qui leur était associé. Tandis que certains de ces crédits optionnels permettent de réduire considérablement les impacts environnementaux, d'autres n'ont pratiquement aucun effet ou peuvent même occasionner une augmentation de ces impacts. Ici, les plus grands bénéfices environnementaux étaient occasionnés par les crédits optionnels relatifs à la consommation énergétique durant la phase d'exploitation du bâtiment due aux sources non renouvelables de l'énergie consommée. Ils ont aussi montré que les crédits optionnels associés aux matériaux de cette version de LEED pouvaient aussi, dans une certaine mesure, influencer de façon importante les impacts environnementaux des bâtiments.

Outre l'étude de Humbert et al. (2007) [75] qui évalue en partie la performance environnementale de LEED en fonction de l'influence de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment, une seule autre étude tendant à faire une telle évaluation a été trouvée : Collinge et al. (2015) [64]. Collinge et al. (2015) [64] ont montré que, dans un contexte nord-américain, l'obtention des crédits optionnels de la catégorie *Matériaux et ressources* de LEED 2009 pouvait engendrer autant une réduction qu'une augmentation des impacts environnementaux du bâtiment. Cependant, les variations des impacts environnementaux obtenus par le changement de matériaux en fonction des critères de la certification n'ont pas été comparées aux résultats d'ACV de l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Cette comparaison aurait été intéressante afin de relativiser l'influence de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux du bâtiment.

Depuis l'entrée de LEED sur le marché, plusieurs publications concluent qu'une intégration générale de l'ACV dans LEED permettrait d'assurer une meilleure performance environnementale de la certification [9,18,74,76]. Toutefois, ce n'est que récemment, avec LEED v4, que les principes de l'ACV commencent à y être intégrés. En fait, l'ACV a seulement été intégrée à deux crédits optionnels parmi la quarantaine de crédits disponibles, dont les deux font partie de la catégorie *Matériaux et ressources*. Cette catégorie est aussi celle qui a subi les plus importantes révisions comparativement à la version précédente. Comparativement aux autres catégories, la majorité des crédits optionnels de la catégorie *Matériaux et ressources* a été redéfinie en incorporant, entre autres, des principes d'ACV et de

performance [69]. Plus précisément, les deux crédits optionnels de la catégorie *Matériaux et ressources* comportant des critères relatifs à l'ACV sont : *Réduction des impacts du cycle de vie du bâtiment (Option 4. Évaluation du cycle de vie de l'ensemble du bâtiment* (valeur de 3 points)) et *Divulgateion et optimisation des produits des bâtiments – Déclarations de produits environnementaux* (valeur de 1 ou 2 points en fonction des options atteintes) (annexe A). Depuis que la documentation de LEED v4 est disponible, il n'y a pas eu d'études qui ont été identifiées lors de la revue de la littérature ayant évalué l'influence de ces nouveaux critères sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments.

Chapitre 2. Objectifs et sommaire de la méthodologie

Cette section présente la problématique et les objectifs qui définissent le projet de recherche. Par la suite, un sommaire de la méthodologie est présenté de façon complémentaire à la méthodologie détaillée dans l'article incorporé au chapitre 3.

2.1 Problématique de recherche

Afin de réduire efficacement les impacts environnementaux des bâtiments, il est primordial de bien comprendre comment se compose le profil environnemental du cycle de vie d'un bâtiment, c'est-à-dire les points chauds, leurs sources et les moyens technologiquement possibles de réduire leurs impacts. Avec le rôle important des certifications dans l'industrie de la construction dans un contexte de pratiques écoresponsables, il est important de se demander si leurs applications permettent réellement de diminuer les impacts environnementaux des bâtiments, peu importe le contexte dans lequel elles sont appliquées. Jusqu'à présent, il n'y a aucune étude qui a été identifiée lors de la revue de la littérature qui évalue à la fois les points chauds du profil environnemental des bâtiments, ces impacts en fonction d'une consommation énergétique du bâtiment occasionnant de faibles impacts sur l'environnement, la variation de ces impacts en fonction de la sélection de différents matériaux et la relation de ces impacts avec les exigences des certifications.

2.2 Objectifs de recherche

2.2.1 Objectif principal

Ce projet de recherche a comme principal objectif de déterminer si l'importance de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment est bien reflétée par la pondération accordée aux matériaux dans le système de pointage de LEED v4 dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement.

2.2.2 Objectifs spécifiques

Afin de répondre à l'objectif principal, trois objectifs spécifiques (O.S.) doivent être atteints :

- O.S. 1 : Identifier les points chauds des impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment à bureaux réel situé au Québec par une ACV ;
- O.S. 2 : Évaluer l'effet de la sélection de divers matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment à l'étude ;
- O.S. 3 : Déterminer la relation entre l'effet des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment à l'étude et la proportion du pointage accordé aux matériaux dans LEED v4.

Il est à noter que ces trois objectifs spécifiques sont en fonction d'un cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement, comme il est mentionné à la section 2.2.1.

2.3 Sommaire de la méthodologie

L'atteinte des trois objectifs spécifiques, et par conséquent de l'objectif principal, est réalisée en trois phases, qui correspondent respectivement à chacun des trois objectifs spécifiques :

- Phase 1 : Réaliser l'ACV d'un bâtiment à bureaux situé au Québec (scénario de base) ;
- Phase 2 : Réaliser l'ACV de scénarios alternatifs, résultant de modifications de certaines configurations de matériaux du scénario de base, et comparer leurs impacts environnementaux respectifs avec ceux du scénario de base ;
- Phase 3 : Comparer la contribution des matériaux aux impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment avec la proportion du pointage accordé aux matériaux dans LEED v4.

Ces trois phases sont présentées en détail à la section 3.4. Aux sous-sections suivantes, seules certaines informations complémentaires à la méthodologie détaillée au chapitre 3 sont présentées.

2.3.1 Informations supplémentaires du scénario de base

Le schéma du bâtiment à l'étude est illustré à la figure 2.1. Les plans, les devis ainsi que quelques autres documents supplémentaires fournis par le partenaire industriel associé à ce projet ne sont pas inclus à ce document par souci de confidentialité. Toutefois, les généralités

concernant les systèmes constructifs composant le scénario de base sont fournies dans cette section. Un sommaire de cette description est présenté à la section 3.4.1.



Figure 2.1 Schéma du bâtiment à l'étude (scénario de base) (Provencher Roy, 2009)

Les bases des colonnes et les murs de fondation en béton armé de ce bâtiment reposent sur un système de pieux. Toute la structure principale, incluant les colonnes, les dalles de plancher, les panneaux de retombée, les murs de refend et les cages d'escalier et d'ascenseur, est en béton armé. Quatre principaux types de murs extérieurs, identifiés par le type de recouvrement utilisé, composent ce bâtiment : panneaux d'aluminium, panneaux de fibrociment, clins de fibrociment et murs-rideaux. La fenestration, en vitrage double, des trois premiers types de murs extérieurs représente un pourcentage d'ouverture de 28 %. Les murs-rideaux, quant à eux, sont en vitrage triple. Excluant le type de recouvrement, les trois premiers types de murs ont une configuration de matériaux similaire, soit des fourrures métalliques et des barres en « Z », de l'isolant semi-rigide, un panneau de revêtement et pare-air/vapeur préfabriqué ainsi que des montants et des sablières métalliques. La quantité de chacun de ces matériaux diffère selon le type de murs. La toiture est constituée de membranes de bitume modifié à l'élastomère reposant sur un panneau de perlite, deux panneaux isolants polyisocyanurate et une membrane pare-vapeur thermofusible sur la dalle de béton de la structure principale. Pour ce qui est de l'aménagement intérieur, les murs sont faits de montants et de sablières métalliques et de panneaux de gypse recouverts de peinture acrylique, les plafonds suspendus sont en carreaux de fibres minérales et les planchers de béton sont recouverts d'un scellant transparent à base d'eau.

2.3.2 Informations supplémentaires des scénarios alternatifs

Comme il est mentionné à la section 3.4.2, certaines configurations de matériaux du scénario de base (S0) ont été modifiées selon six scénarios alternatifs (S1 à S6). La configuration des murs extérieurs du scénario de base, qui est constitué de quatre différents types de murs, est modifiée pour les quatre premiers scénarios (S1 à S4). Chacun de ces scénarios résulte du changement des murs extérieurs du scénario de base par la totalité d'un des quatre types de murs extérieurs. Pour ce qui est des deux autres scénarios alternatifs (S5 et S6), c'est la configuration de matériaux de la structure principale qui est modifiée. Pour le S5, la structure en béton est modifiée pour une structure complètement en bois lamellé-collé, incluant les systèmes poteaux-poutres et les platelages en bois. Pour le S6, la structure en béton est modifiée pour une structure d'acier, incluant les colonnes, les poutres, les poutrelles, les contreventements et le pontage, avec une dalle en béton armé pour les planchers. Les quantités de matériaux pour S5 et S6 ont été estimées à partir du logiciel *Impact Estimator for Buildings* d'Athena [77].

2.3.3 Calcul relatif à l'inventaire des éléments constituant le bâtiment

La première étape du calcul relatif à l'inventaire des éléments constituant le bâtiment a consisté à collecter les informations relatives aux matériaux nécessaires pour construire le scénario de base, pour la Phase 1, et les scénarios alternatifs, pour la Phase 2, telles que leur quantité, leur type, leurs caractéristiques spécifiques, etc. Les plans, les devis et les autres documents fournis par le partenaire industriel, la documentation technique fournie par les manufacturiers ainsi que quelques informations provenant du logiciel *Impact Estimator for buildings* d'Athena [77] ont été utilisés comme sources de données pour l'inventaire des éléments constituant le bâtiment pour l'ensemble des scénarios. Une fois ces données collectées, la deuxième étape a consisté à calculer les quantités permettant de modéliser le bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie. Ces quantités (section C.1 de l'annexe C) ont pu être évaluées selon les formules inscrites au tableau 2.1.

Tableau 2.1 Formules utilisées pour calculer l'inventaire des données primaires

<i>Phases</i>	<i>Quantité de matériaux</i>	<i>Transport (Distance-poids)</i>
<i>Construction</i>	$Q_{Mc} = Q_{Mi} * CWF_M * C_M$	$Q_{Mct} = Q_{Mc} * D_{Mp} * C_{M-kg}$
<i>Rénovation</i>	$Q_{Mr} = Q_{Mi} * CWF_M * C_M * \sup\left(\frac{DV_B}{DV_M} - 1\right)$	$Q_{Mrt} = Q_{Mr} * D_{Mp} * C_{M-kg}$
<i>Fin de vie</i>	$Q_{Mfr} = R(Q_{Mc} + Q_{Mr})$ $Q_{Mfe} = (1 - R)(Q_{Mc} + Q_{Mr})$	$Q_{Mft} = (Q_{Mfr} + Q_{Mfe}) * D_{Mf} * C_{M-kg}$
<i>Quantité d'énergie consommée</i>		
<i>Consommation énergétique</i>	$Q_E = Q_{Ei} * S_B * DV_B$	

Où,

- C_M : Facteur de conversion d'unité entre ce qui a été calculé à partir des informations fournies et ce qui doit être utilisées pour la modélisation dans le logiciel SimaPro
- C_{M-kg} : Facteur de conversion en kg de ce qui a été calculé à partir des informations fournies
- CWF_M : Facteur de pondération pour considérer les pertes de matériaux lors des travaux de construction (CWF : Construction Waste Factor)
- D_{Mf} : Distance parcourue entre la localisation du bâtiment et le site de dépôts des matériaux en fin de vie
- D_{Mp} : Distance parcourue entre le manufacturier et la localisation du bâtiment
- DV_B : Durée de vie du bâtiment (en années)
- DV_M : Durée de vie du matériau ou du sous-système auquel le matériau fait partie (en années)
- Q_E : Quantité d'énergie nécessaire pour alimenter le bâtiment durant sa phase d'exploitation
- Q_{Ei} : Quantité d'énergie nécessaire modélisée pour alimenter le bâtiment durant sa phase d'exploitation (en kWh/(an*m²))
- Q_{Mc} : Quantité de matériaux nécessaires pour la phase de construction
- Q_{Mct} : Quantité de matériaux transportés nécessaires pour la phase de construction (en distance * poids)
- Q_{Mfe} : Quantité de matériaux enfouis lors de la fin de vie du bâtiment ou d'un sous-système
- Q_{Mfr} : Quantité de matériaux recyclés lors de la fin de vie du bâtiment ou d'un sous-système
- Q_{Mft} : Quantité de matériaux transportés lors de la fin de vie du bâtiment ou d'un sous-système (en distance * poids)
- Q_{Mi} : Quantité de matériaux constituant le bâtiment déduite des informations fournies
- Q_{Mr} : Quantité de matériaux nécessaires pour la phase rénovation
- Q_{Mrt} : Quantité de matériaux transportés nécessaires pour la phase rénovation (en distance * poids)
- R : Taux de la quantité de matériaux qui est recyclée
- S_B : Superficie totale du bâtiment (en m²)
- sup : arrondir au nombre entier supérieur

2.3.4 Limites des matériaux considérés

Considérant l'ampleur d'un bâtiment par la quantité considérable de différents matériaux pouvant le constituer, une limite massique a été posée afin d'alléger considérablement la longueur de l'étude. Comme il est mentionné à la section 3.4.1, un seuil massique minimal de 0,05 % de contribution au poids total du bâtiment a été ainsi posé afin de limiter le nombre de matériaux considérés dans le cadre de l'étude. De plus, l'étude se limite seulement au bâtiment en soi, soit à tous les matériaux se trouvant à l'intérieur de la limite extérieure de l'enveloppe du bâtiment. Plus d'informations sur les données d'inventaires utilisées sont présentées au chapitre 3, au chapitre 4, à l'annexe B et à l'annexe C.

Chapitre 3. LEED v4: Where are we now? Critical assessment through the LCA of an office building using a low impact energy consumption mix

3.1 Avant-propos

Auteurs et affiliation :

- Yannick Lessard : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil et étudiant de la Chaire Industrielle de Recherche sur la Construction Écoresponsable en Bois (CIRCERB)
- Chirjiv Anand : stagiaire postdoc, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil
- Pierre Blanchet : professeur, Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt, et titulaire de la Chaire Industrielle de Recherche sur la Construction Écoresponsable en Bois (CIRCERB)
- Caroline Frenette : professeure associée, Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, Département des sciences du bois et de la forêt, et conseillère technique, Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois (Cecobois)
- Ben Amor : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie civil.

Date de soumission : 14 janvier 2017

Revue : Journal of Industrial Ecology

Titre français : *LEED v4 : Où en sommes-nous maintenant? Analyse critique par l'ACV d'un bâtiment à bureau consommant de l'énergie occasionnant de faibles impacts sur l'environnement.*

Contribution au document :

Cet article contribue au mémoire en présentant l'ensemble des résultats et des conclusions permettant d'atteindre les objectifs spécifiques et, par conséquent, l'objectif principal du projet de recherche.

Résumé français :

Divers systèmes de certification pour le bâtiment, en anglais Green Building Rating Systems (GBRS), sont proposés afin de réduire les impacts environnementaux des bâtiments. Toutefois, ces GBRS, incluant LEED v4, ont tendance à se concentrer principalement sur la consommation énergétique durant la phase d'exploitation du bâtiment. Par conséquent, leur application dans un contexte où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement, telle que celle provenant de sources renouvelables, peut mener à des effets indésirables. Basé sur une étude d'un bâtiment à bureaux existant situé au Québec (Canada), où plus de 95 % de l'énergie alimentant le réseau électrique est renouvelable, l'objectif de cette étude est de comparer les effets des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment à leurs considérations dans LEED v4. Les effets des matériaux peuvent se traduire par leurs contributions sur les impacts environnementaux des bâtiments et par leur potentiel de faire varier ces impacts par la sélection de différentes configurations de matériaux. Les impacts environnementaux sont évalués par une analyse du cycle de vie (ACV) attributionnelle à l'aide du logiciel SimaPro 8.2, la base de données ecoinvent 3.1 et la méthode d'EICV IMPACT 2002+. Les résultats d'ACV du scénario de base montrent que les matériaux contribuent de façon importante aux impacts environnementaux du bâtiment (> 50 %) comparativement à ceux de la consommation énergétique du bâtiment. De plus, le potentiel des matériaux à faire varier les résultats d'ACV peut être supérieur à 50 %. Par ces résultats, il est montré que LEED v4 ne semble pas bien capturer ces effets des matériaux sur les impacts environnementaux sur le cycle de vie des bâtiments par son système de pointage. Effectivement, le pointage accordé aux matériaux dans LEED v4 est de 13 points (ou 30 %) en comparaison à la consommation énergétique, qui est de 33 points (ou 70 %). Les résultats de ce projet de recherche permettent donc d'aider les divers acteurs de la construction à améliorer le profil environnemental des bâtiments en fournissant une meilleure compréhension des présentes limites de LEED v4 du point de vue d'une étude de cas dont l'énergie consommée occasionne de faibles impacts environnementaux.

Note :

Un document associé à cet article contenant des informations supplémentaires, intitulé *LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment Through the LCA of an Office Building Using a*

Low Impact Energy Consumption Mix. (Supplementary information), est présenté à l'annexe C.

3.2 Abstract (*début de l'article*)

Various Green Building Rating Systems (GBRS) have been proposed to reduce the environmental impact of buildings. However, these GBRS, including LEED v4, are primarily oriented towards energy consumption from the use stage. Their application to situations involving a high share of renewable energy and hence a low impact energy consumption mix can result in undesirable side effects. Based on an existing office building in Quebec (Canada), where more than 95% of the consumption mix is renewable, this study aimed to compare the effect of materials on building LCA impacts to their consideration in LEED v4. The effects of materials are defined by their contributions to building LCA impacts, and by their potential for changing such impacts through the adoption of different material configurations. The attributional LCA impacts were evaluated using Simapro 8.2, ecoinvent 3.1 database, and the IMPACT 2002+ method. The building LCA results indicated high environmental impact contributions from materials (> 50%) compared to those from energy consumption. Moreover, the potential for materials to modify LCA results could exceed 50%. By comparison, the LEED v4 rating system did not seem to be as effective in capturing the effects of materials. As a matter of fact, material selection represents 13 points (or 30%) by comparison with 33 points (or 70%) for energy consumption. The conclusions drawn from this work will help stakeholders from the building sector to improve building environmental profiles, providing a better understanding of the present limitations of LEED v4 in situations involving a low impact energy consumption mix.

Keywords: Building, Structure and envelope materials, Life cycle assessment, Certification, Environmental impact.

3.3 Introduction

Life cycle thinking in the construction sector began in the early 1980s with a study by Bekker (1982). The author showed the importance of using a life cycle approach to evaluate environmental impacts in the building sector [78]. With the increase of methodological

development in life cycle assessment (LCA), this tool has become increasingly relevant to assess buildings' environmental impacts [3,4].

In the early 1990s, the high contribution of building environmental impact was recognized by the building sector [1,2]. Since then, many efforts have been made to improve industry standards and building codes with the main objective of reducing the environmental impacts of buildings, with particular attention to global warming impacts [28]. Some certification programs for improving and encouraging building environmental performance have been developed, such as Green Building Rating Systems (GBRS). Amongst a large number of GBRS available, the Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (BREEAM), in the United Kingdom, and the Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), in the United States, are two of the most currently used GBRS across the world [66]. LEED was developed by the U.S. Green Building Council (USGBC) and adapted to the Canadian context by the Canada Green Building Council [79]. Since its development in 1999 [72], LEED has been updated over time by enlarging its scope [70] until its newest version (LEED v4) released in 2013 [11]. This certification aims to identify, implement and measure, amongst other things, the green building design, construction, operation and maintenance [72].

The New Construction rating system (LEED v4 BD+C: New Construction), one of the 21 different rating systems available in LEED v4 [71], is defined in nine categories (figure 3.1). These categories are composed of prerequisites and optional credits. These credits correspond to different indicators (electricity consumption, noise, etc.) dealing with either one or all building life cycle stages. Each of the optional credits is weighted with a given number of points according to its importance in the certification. An example of MR LEED v4 optional credits is provided in section C.3. Overall, 110 points are spread over 43 optional credits. As a condition for earning LEED v4 certification, all prerequisites and enough points from optional credits must be achieved to reach the minimum score to the targeted LEED v4 level. LEED v4 can be awarded at four levels [72]: Certified (40-49 pts), Silver (50-59 pts), Gold (60-79 pts), and Platinum (80 pts and more).

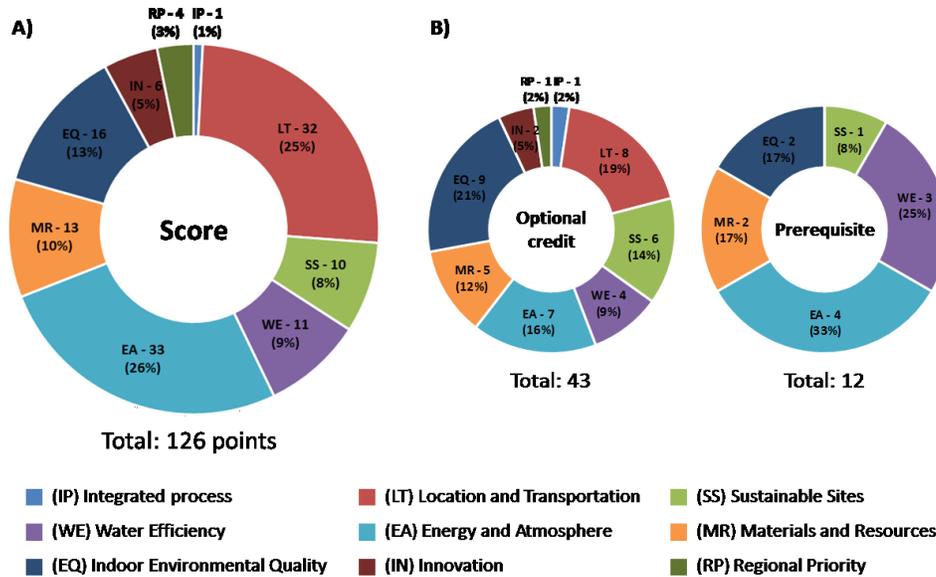


Figure 3.1 LEED v4 BD+C: New Construction rating system. A) Points allocated to each category and their contribution to the total available points (110); B) Optional and prerequisite credits corresponding to each LEED v4 category, and their respective contributions.

A few studies have evaluated the influence of LEED on building LCA impacts [5,73,75]. Their results showed that LEED (previous version; 2009) can reduce building LCA impacts, as the main environmental burden was related to the energy consumption mix. These studies also showed that the environmental impact reduction potential attributable to LEED implementation was not uniform throughout the certification scheme, and could vary considerably depending on the optional credits, the intended LEED certification level (silver, gold, etc.), the building type and the energy consumption mix. In fact, some LEED scores did not yield a reduction of the overall LCA impacts [9,73,75]. As shown in figure 3.1, LEED v4 gives more weight to Energy consumption (30% for the EA category), than to other categories such as construction materials (12% for MR category). This weighting is explained by the important environmental impact contribution of the building's use stage (from 60% to 90%) [4,6,41], mainly explained by the high impact of the energy consumption mix (i.e. fossil-based). Other recent studies have shown that, when non-renewable sources are replaced with renewable ones such as hydroelectricity, the trend can be greatly modified [7–9,40]. As a matter of fact, in the context of a low environmental impact energy consumption mix, the use stage contribution to the total building LCA impacts can be as much as eight times lower

than that of the construction stage [8]. This means that, under such circumstances, material selection could play a crucial role in decreasing building LCA impacts.

To the best of our knowledge, studies assessing the influence of material selection on the whole building LCA performance in such an energy context are rare in the literature [48,60]. Although the number of building LCA publications is increasing significantly [35,55,62,80–83]. This paper will help to fill this gap. As such, this study aims to 1) identify environmental hotspots in an office building using LCA methodology in the context of a low environmental impact energy consumption mix; 2) assess the extent to which material selection (i.e. different material scenarios) could change the building environmental impacts; and 3) compare material contributions to the office building LCA impacts with the MR points attributed by the LEED v4 rating system. This work was based on an office building located in Quebec, Canada, in a context of low environmental impact energy consumption mix with 99% of renewable electricity, of which 96% comes from hydropower, and 1% from fossil and nuclear energy, mainly from imports [49,50].

3.4 Methodology

The methodology followed three main steps reflecting the objectives of the study: 1) LCA of the Base Case Scenario (section 3.4.1); 2) LCA Scenario Evaluation (section 3.4.2); and, finally, 3) Critical Assessment of LEED v4: Assessment of MR Point Attribution in LEED v4 and Comparison with LCA Results From the Base Case and Other Scenarios (section 3.4.3). This methodology is summarized in figure 3.2.

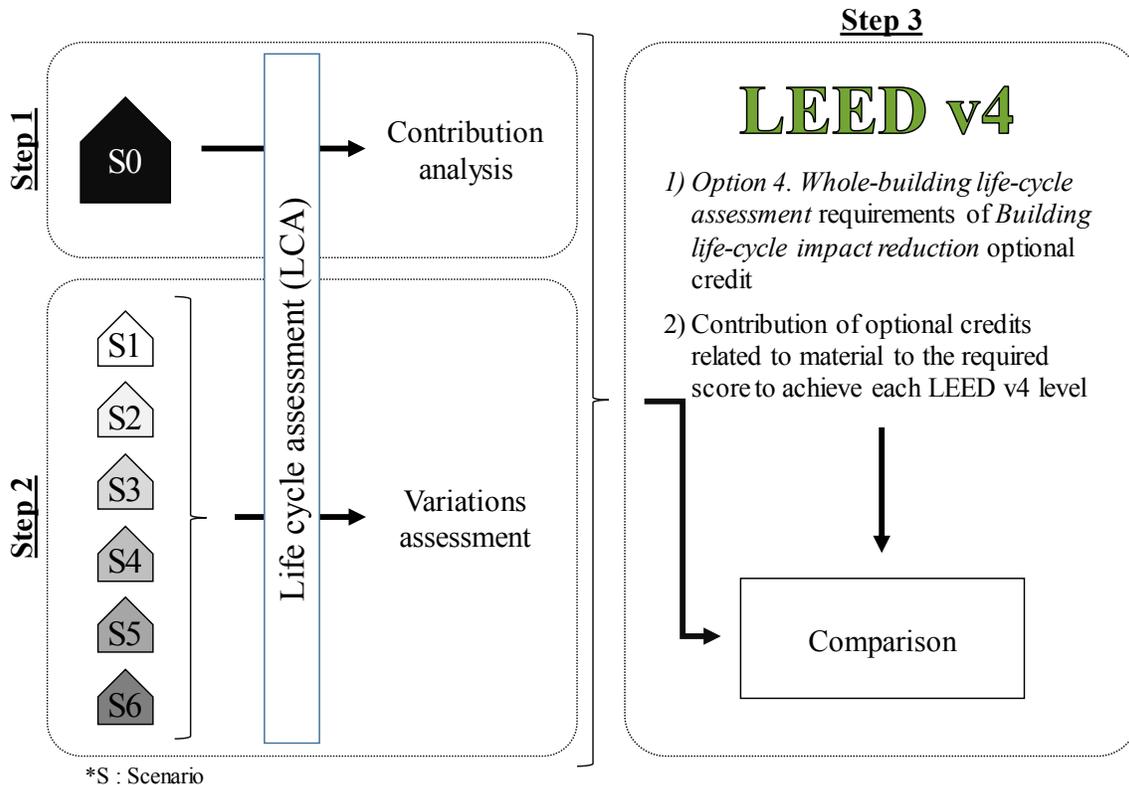


Figure 3.2 Summary of the study's methodology

3.4.1 LCA of the base case scenario

ISO standards 14040-44 [13,14] were followed to perform the attributional LCA, in coherence with LEED v4 requirements [72], of an existing six-story office building (called the base case or S0 in figure 3.2). Located in Brossard, Quebec, Canada, the building has a gross floor area of 10,300 m² and an expected lifespan of 50 years. According to the industrial partner involved in the project, the base case, with its LEED-NC Silver LEED v1.0 certification, represents a typical office building built in the province of Quebec (Provencher_Roy 2016). Tableau 3.1 presents the main structure and envelope configuration of the base case (S0). The selected functional unit is 1 m² of an office space for 50 years lifespan, which is the most frequent functional unit found in the literature [4,29,41]. Finally, its selection was meant to help us crosscheck the results with the literature, and analyze them. The system boundary is divided into five stages: supplying, pre-occupancy, occupancy, post occupancy, and waste management (figure 3.3). For the occupancy stage, only the energy consumed was considered, in addition to the different resources needed for refurbishment. Resource consumption due to

occupant activities, such as the use of office supplies, furniture, etc., were excluded from the analysis.

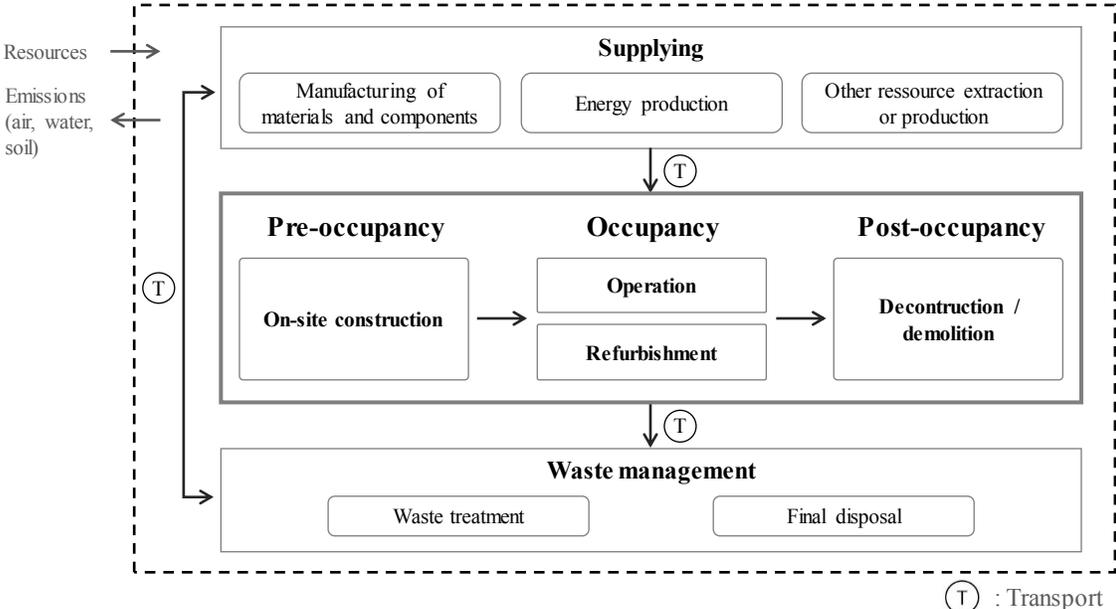


Figure 3.3 System boundary of the base case office building

Primary data, including types and quantities of building materials used, building energy consumption and expected life spans of building materials, were collected from the plans and specifications provided by the study partner involved in the construction of the base case scenario. When data were missing, technical specification sheets from manufacturers and secondary data from the literature were used. Finally, Athena’s Impact Estimator for Building 5.1 software [77] was used to estimate required amounts of materials when these were not available (e.g. attachments). The same approach was used for available quantities for validation purposes. Secondary data came from ecoinvent database v3.1, using the “allocation, recycled content” approach [84]. Ecoinvent v3.1 is considered one of the suitable databases for LCA modelling of construction systems [3]. It is worth noting that it contains a regionalized Quebec dataset that is coherent with the geographical scope of the study [26,27]. Some rules were applied to simplify building LCA modelling. The area surrounding the building, user activities and water consumption were not considered in the study. Moreover, a cut-off rule was used to exclude all materials accounting for less than 0.05% of the total weight of the building materials. Consequently, all building mechanical and electrical systems were excluded from the analysis due to their low weight contributions.

Building materials were categorized into four building subsystems: interior finish (IN), envelope (EN), foundation (FO) and structure (ST). The corresponding amounts of materials are presented in tableau C.1.1 and tableau C.1.2. The building end-of-life stage includes all material waste generated during the demolition stage of the office building, as well as waste generated during the construction and refurbishment stages. In coherence with the “cut-off rules” used in the “allocation, recycled content” approach in ecoinvent 3.1, the use of recycled materials and their corresponding impacts or benefits were considered at the beginning of the building life cycle only and not at its end. Therefore, if a material is recycled after the demolition of the office building, the primary producer does not receive any credit for the provision of any recyclable materials [85]. Given the high uncertainty in predicting an end-of-life scenario after 50 years, all materials are considered to be landfilled, as a worst-case scenario. However, to identify the influence of this hypothesis on the conclusions, a sensitivity analysis was performed using an optimistic scenario (100% recycling, and hence, a cut-off approach). The energy consumption during the use stage of the building (base case) was modelled by the industrial partner during the design phase and is estimated to be 121.5 kWh / (m²-year). This includes lighting, heating, ventilation, air conditioning (HVAC), water heating and all other forms of energy consumption from electrical outlets. Readers should note that this low energy consumption is explained by the fact that the base case is certified LEED-NC Silver LEED v1.0. Finally, Quebec’s electricity consumption mix is the only energy source for the office building .

The building LCA impacts were assessed by using the midpoint categories from the impact method IMPACT 2002+ [17]. As listed in tableau 3.2, LEEDv4 only involves midpoint categories and explain the focus on midpoint category results in this work. However, the endpoint category results are only available in supplementary information (see section C.4). Readers should note that LEED v4 does not specify any particular impact method, as long as the categories shown in tableau 3.2 are used. Finally, two sensitivity analyses were also conducted to assess the robustness of the LCA results. The first used a second impact method, TRACI v2.1 [32]. This LCA method is North American with fewer impact categories than Impact 2002+. The second sensitivity analysis dealt with the building energy consumption, which, as mentioned earlier, is estimated during the building design phase and not measured during the occupancy stage. A variation of $\pm 20\%$ of the energy consumed was applied to

assess the robustness of the results. Finally, all the modelling was performed using SimaPro 8.2.

3.4.2 Scenario Evaluation

Following identification of the materials hotspots from the LCA results, six hypothetical scenarios were defined to single out those having the greatest potential for reducing environmental impact over the base case scenario. These scenarios were defined in line with the commonly used alternative materials and in close collaboration with the study industrial partner due to frequent requests from architects for these scenarios. Of the six scenarios, as shown in tableau 3.1, four involved exterior wall modifications of the building envelope, and two involved building structure modifications.

Tableau 3.1 Comparison between the base case scenario (S0) and the 6 hypothetical scenarios (S1-S6)

Scenarios	Base case scenario (S0) Initial material configuration	Material modifications
S1	<u>Exterior walls (Envelope)*:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Aluminum siding type (40%) • Fiber cement panel siding type (9%) • Fiber cement clapboard siding type (28%) • Curtain wall type (23%) 	Aluminum siding type (100%)
S2		Fiber cement panel siding type (100%)
S3		Fiber cement clapboard siding type (100%)
S4		Curtain wall type (100%)
S5	<u>Structure type:</u> <ul style="list-style-type: none"> • Reinforced concrete 	Wood structure
S6		Steel structure with reinforced concrete slab

*Percentage refers to the total building exterior wall surface area.

For S1 to S4, each scenario was defined by one type of exterior wall configuration. The material amount per unit area of the associated exterior wall type provided by the industrial partner was multiplied by the total exterior wall surface area. The same approach was repeated from S1 to S4. The opening rate considered for S1 to S3 was the average of the three exterior wall configuration types associated in S0, 28%, excluding the curtain walls. For S4, all exterior walls were considered curtain walls, without taking into account any opening rate. Regarding S5 and S6, Athena's Impact Estimator for Building 5.1 software [77] was only used to estimate the amount of materials required to replace the base case structure with other types of materials. A comparison between the amount of base case structure materials calculated from the plans and specifications, and estimated by Athena's software showed that the two methods gave similar amounts of materials (see section C.2). All the material quantities

obtained for the six new scenarios are listed in Table C.1. For all scenarios (S1 to S6), the amount and type of electricity consumed during the use stage were assumed to be the same as in the base case scenario. Again, a variation of $\pm 20\%$ of the energy consumed was applied to assess the robustness of the results. IMPACT 2002+ is once again used to assess the LCA impacts of the six scenarios. The results were compared to the base case LCA results to highlight the extent to which each scenario (and hence each material configuration) can improve environmental performance over the base case scenario.

3.4.3 Critical assessment of LEED v4

As mentioned previously, the LEED v4 rating system for Building Design and Construction, New Construction (BD+C - NC) was selected for this study. The critical assessment of LEED v4 focused on the material consideration in its rating system. The aim of the assessment was to highlight how materials selection (from S1 to S6) affects building's LCA impacts (S0) and LEED v4 score.

To do so, two evaluations were proposed. The first compared the material contribution to the building LCA impacts with the point distribution between material credits (MR category) and energy consumption credits (EA category). More information related to MR LEED v4 optional credits is provided in section C.3. The point distribution was simply obtained by dividing the total amount of points available in the MR category (13 points; 28%) by the total number of points (46 points; 100%) attributed to the MR (13 points) and EA (33 points) categories. This comparison was repeated for the different certification levels. As explained in section 3.3, LEED certification can be achieved under four different levels. The minimum point threshold is 40 points, which requires achieving the certified level; and the maximum point threshold is 110 points, which requires achieving all available points in LEED v4, even if this is very difficult in practice. These values were calculated by dividing the total number of points attributed to the MR category, 13 points, by these thresholds. The resulting percentages ranged between 12 and 33%. Keeping in mind that it is very difficult to capture, the effect of implementing the requirements related to the material optional credits on the building LCA impacts was not evaluated, and was considered outside the scope of the study.

The second comparison refers to the requirements of the “Option 4 in LEED v4: Whole building life cycle assessment” of “Building life cycle impact reduction” optional credit in the

LEED v4 MR category. According to Option 4 requirements, the building (i.e. six scenarios in our case) should be compared to the baseline building (i.e. the base case S0) with respect to environmental impacts. The comparison should demonstrate a decrease by more than 10% in at least three of six specified impact categories listed in the right column of tableau 3.2, and no impact categories must increase by more than 5% [72]. In addition to listing the specific impact categories to be used for the assessment, LEED v4 allows the user to select an LCIA method as long as the specific impact categories are included. As shown in tableau 3.2, IMPACT 2002+ is one of the LCIA methods that fulfill the requirement. More technical details about the Option 4 requirements are provided in section C.3. For this second comparison, we extended the analysis further by also including the IMPACT 2002+ impact categories that are not listed in the LEED v4 option 4 requirements. Finally, a sensitivity analysis was also performed with a second LCIA method, TRACI 2.1, presented in section 3.4.2, to assess the robustness of this second comparison.

Tableau 3.2 Comparison of IMPACT 2002+ midpoint categories with LEED v4 option 4 categories requirement [17,71]

IMPACT 2002+	LEED v4 Option 4
Carcinogens	X
Non-carcinogens	
Respiratory inorganics	
Ionizing radiation	
Ozone layer depletion	Depletion of the stratospheric ozone layer
Respiratory organics	Formation of tropospheric ozone
Aquatic ecotoxicity	X
Terrestrial ecotoxicity	
Terrestrial acidification/nitrification	Acidification of land and water sources*
Aquatic acidification	Acidification of land and water sources*
Land occupation	X
Aquatic eutrophication	
Global warming	Global warming potential (greenhouse gases)
Non-renewable energy	Depletion of non-renewable energy resources
Mineral extraction	X

* In IMPACT 2002+ method, the Terrestrial acidification and the Aquatic acidification are split into two distinct impact categories, unlike LEED v4 requirements.

3.5 Results and discussion

3.5.1 LCA results of the base case scenario

The LCA results for the base case scenario are first presented in figure 3.4, which shows the contribution of the different building life cycle stages. To facilitate the presentation of the results, the base case life cycle impacts are divided into four stages :

- *Construction*. This stage includes the supplying and pre-occupancy stages as well as all transportation to the building construction site.
- *Refurbishment*. This stage includes supplying, refurbishment and all transportation to the building site.
- *Energy consumption*. This stage includes electricity consumption of the building along its life span (50 years).
- *End of life*. Following the cut-off approach explained in section 3.4.1, this stage includes post occupancy and waste management stage as well as all transportation from the construction site to the waste management site. The waste generated by the construction and refurbishment stages is also included in this stage.

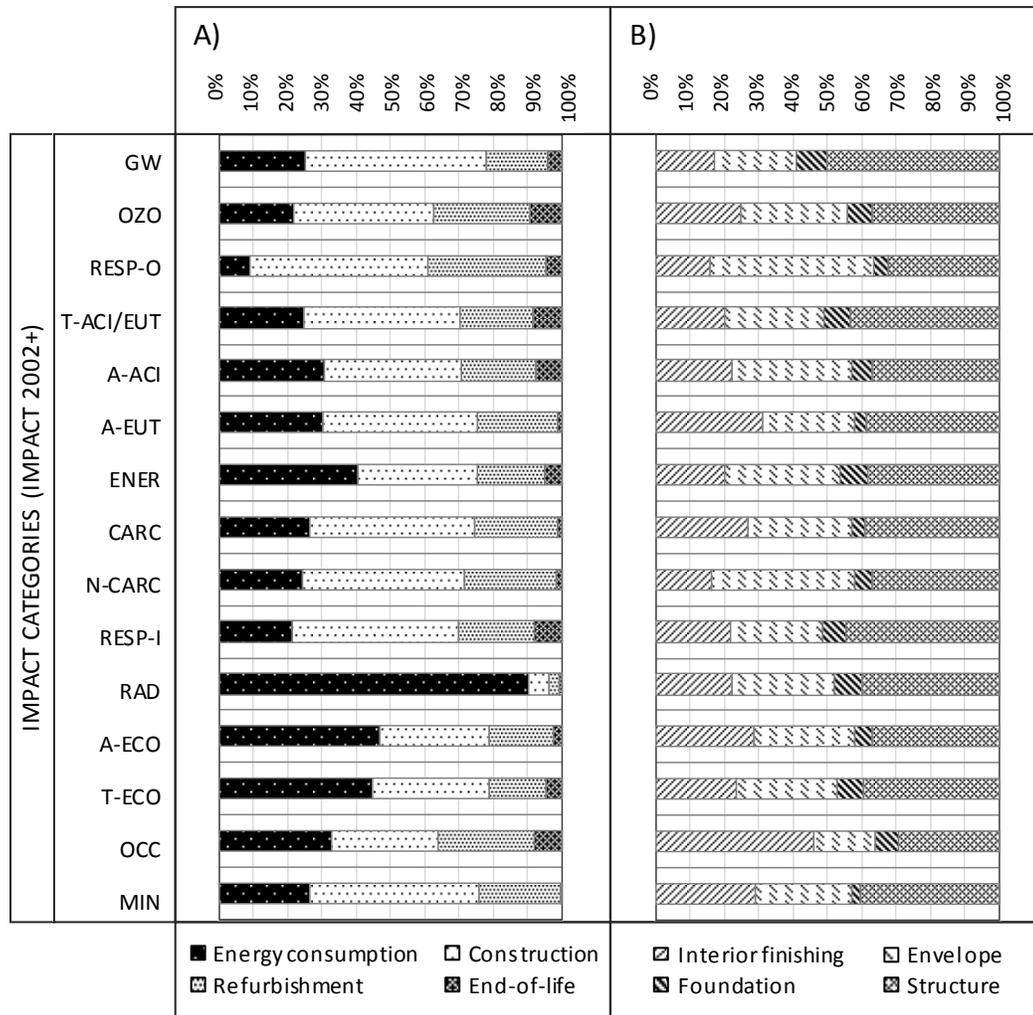


Figure 3.4 Contribution analysis of the office building life cycle environmental impacts using the IMPACT 2002+ method. Part (A) refers to the contributions of the base case scenario life cycle stages and part (B) refers to the contributions of materials excluding the use stage. Midpoint categories are: Global warming (GW), Ozone layer depletion (OZO), Respiratory organics (RESP-O), Terrestrial acidification and nitrification (T-ACI/EUT), Aquatic acidification (A-ACI), Aquatic eutrophication (A-EUT), Non-renewable energy (ENER), Carcinogens (CARC), Non-carcinogens (N-CARC), Respiratory inorganics (RESP-I), Ionizing radiation (RAD), Aquatic ecotoxicity (A-ECO), Terrestrial ecotoxicity (T-ECO), Land occupation (OCC) and Mineral extraction (MIN).

As shown in figure 3.4 (part A), in a context of low impact energy consumption mix such as prevails in the province of Quebec, materials dominated the office building LCA impacts (> 50%) for all the categories other than Ionizing radiation. The highest contribution of the energy consumption stage (90%) was mainly due to the nuclear electricity imported from Ontario. For the remaining impact categories, the highest contributions of materials were mainly explained by the low environmental impacts of Quebec's energy consumption mix. These percentages are also summarized in figure 3.5 (part A), while the absolute values per

functional unit are presented in an Excel file in the appendix. Similar results have recently been reported from studies where the energy mix environmental impacts are very low [7–9].

The largest impact came from the construction and refurbishment stages, with a bigger share accruing to the construction stage. The end-of-life stage caused the lowest environmental impact (0% to 9%), even when all materials were considered to be landfilled. A more detailed contribution analysis focusing on the end-of-life stage was performed to assess the robustness of the results (see Excel file in the appendix). From a material contribution perspective, excluding use stage energy consumption (figure 3.4 (part B)), the main hotspots were driven by 1) Envelope, 2) Structure, and 3) Interior finishing. Similar results were noticed in other studies [48,55,80,81]. Finally, the sensitivity analysis involving a $\pm 20\%$ variation in energy consumption (see figure C.6.2 and Table C.6.2) revealed that building materials impacts remained the highest, suggesting the robustness of previous observations. Moreover, the results obtained from the second sensitivity analysis, performed with a different LCIA method, TRACI 2.1, confirmed the previous results (figure C.6.1.1). More details on the highest environmental impact contributors are presented in section C.4.

3.5.2 Results of other scenario evaluations

The results presented in figure 3.5 (part B) help to understand the magnitude of the environmental impact variation for each scenario as a result of changing different materials from the base case scenario. A summary of the building LCA impact variations is also presented in tableau 3.3.

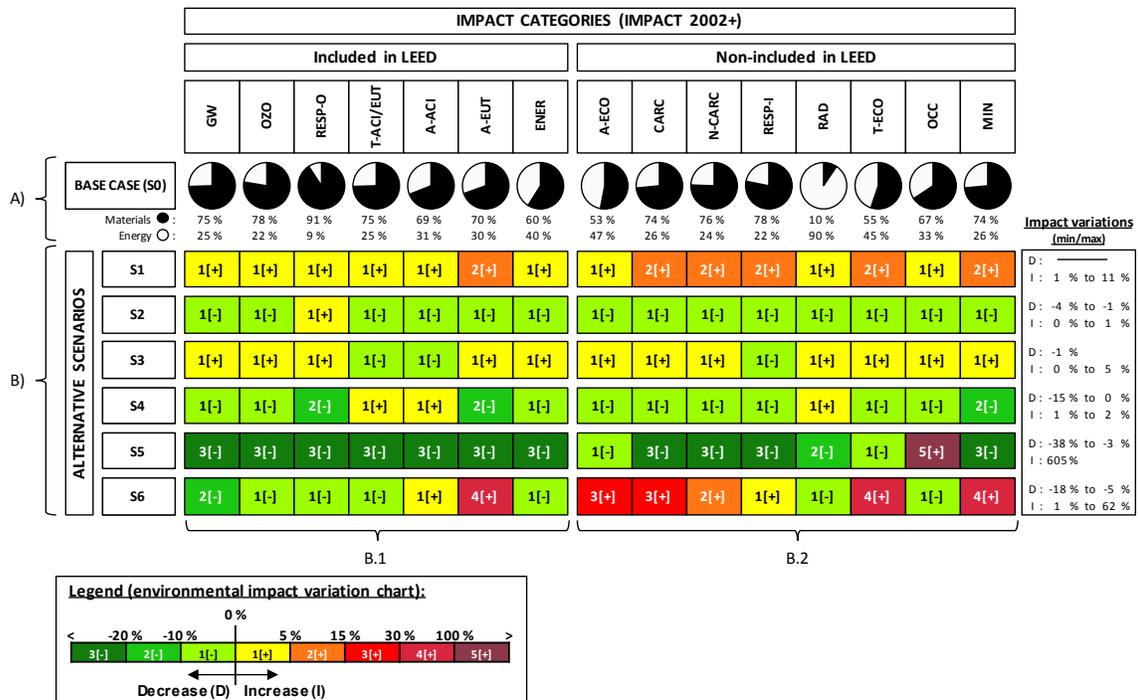


Figure 3.5 Material effects on office building LCA impacts using the IMPACT 2002+ midpoint categories. A) The S0 row displays the contributions of energy consumption (in white) and materials (in black) in the building LCA impacts. B) Variations due to material changes from the base case scenario for the six scenarios. IMPACT 2002+ impact categories are divided into two parts: included (B.1) and not included (B.2) in LEED v4. The thresholds to obtain “Option 4. Building life cycle impact reduction” optional credit are defined by the first four quotations in the legend, an increase (< 5%) is identified by the “1[+]” quotation and the minimum decrease (< -10%), by the “2[-]” quotation.

Figure 3.5 shows that using only an aluminum siding (S1) as the building envelope raises the environmental impact by up to 11% in all categories compared to the base case scenario, while using a fiber cement panel siding (S2) slightly reduces environmental impacts. The difference between the fiber cement panel siding scenario (S2) and the fiber cement clapboard siding scenario (S3) is mainly captured by the material quantities involved, because both are built approximately with the same material types. However, S3 has higher impacts in all categories than S2 as it needs more material to cover the same area. For the curtain walls scenario (S4), environmental impacts in most categories decreased by up to 15%, but there were also slight environmental impact increases in a few categories. For these four scenarios, a large part of the environmental impact variations was due to the use of different amounts of metal products (steel and aluminum). Using less of these materials could reduce the building LCA impacts in most cases, and hence meet Option 4 requirements.

Replacing the concrete structure with a wood structure (S5) appeared to decrease all environmental impacts (-38% to -3%), except for the land occupation impact category (see figure 3.5 (part B)). The environmental impact from this category increased by 605%. The contribution of wood materials to the land occupation impact category has also been shown by few other studies [62,82]. This high increase is due to the state of the art in assessing the use of high quantities of wood products, which contribute to higher pressure on land use. However, these estimated impacts are based on a historic case study from Switzerland [40] and do not take into account more recent forest management in Canada and hence a better regionalized characterization factors. . Finally, replacing a concrete structure or a steel structure with concrete slabs (S6) seemed to considerably increase environmental impacts for many categories. The high increases were mainly due to the higher volumes of steel products required, as shown by some other studies [81,83].

As mentioned in section 3.4.2, the same energy consumption as the base case scenario was assumed in all scenarios. A sensitivity analysis based on a $\pm 20\%$ variation in energy consumption showed that conclusions discussed earlier remained the same in all scenarios (see Table C.6.2). The second sensitivity analysis conducted with another LCIA impact method, TRACI 2.1 (see figure C.6.1.2) showed that the above-mentioned observations remained fairly similar regardless of the impact method. Finally, more details and a disaggregated view of figure 3.5 (part B) are provided in section C.5.

3.5.3 Critical assessment of LEED v4

As indicated in section 3.4.3, two evaluations were proposed for the critical assessment of LEED v4. The first compared the material contribution to the building LCA impacts (presented in section 3.1) with the point distribution between material credits (MR category) and energy consumption credits (EA category). The point distribution was simply obtained by dividing the total number of points available in the MR category (13 points; 28%) by the total number of points (46 points; 100%) granted for both the MR (13 points) and EA (33 points) categories. As shown in tableau 3.3, this comparison was repeated for the different certification levels. The results, presented in tableau 3.3, show that the contribution of the MR category (28%) was lower than that of the EA category. This contradicted previous results, where, in the context of a low impact energy consumption mix, the share of materials LCA

impacts was above 50% (figure 3.5 part A). Moreover, when the potential of material selection to affect the building LCA impacts (see impact variations box in figure 3.5) was compared to the variation in points obtained from the LEED v4 MR category (12 to 33%), some important differences were noticed. This was mainly captured by Scenarios S5 and S6.

The second comparison referred to the requirements of the “Option 4 in LEED v4: Whole building life cycle assessment” of “Building life cycle impact reduction” optional credit in the LEED v4 MR category. The Option 4 requirements of LEED v4 are integrated in the environmental impact variations presented in figure 3.5. As shown in Part B.1, none of the 6 scenarios in the study showed a significant environmental impact improvement for the non-LEED v4 categories over the LEED categories. This suggests that the selected LEED categories are necessary to avoid discrimination of good scenarios. The curtain wall scenario (S4) showed good potential for meeting the requirements of Option 4. However, only one impact category was missing for checking the minimum 10% reduction (2[-] quotation) in at least three impact categories. This was also coherent when considering the impact categories not included in LEED v4. Similar observations applied to the fiber cement panel siding scenario (S2), which showed good potential too. In Scenario S6, environmental impacts increased by large percentages, with a third of the impact categories showing increases of more than 15%. Additionally, only Scenario S5 (wood structure) met the Option 4 requirements, even if it is not totally the case from an LCA perspective. This finding suggests a continuous revision of LEED categories following the certification of multiple scenarios in order to avoid burdens shifting when scenarios meet the Option 4 requirements. It is also worth noting that the selection of the base case scenario can have a significant influence on the results, which also suggests that further investigation is required to delineate the boundaries defining the base case scenario.

Tableau 3.3 Comparison between building material LCA contributions and MR LEED v4 contribution. Impacts and points variations were also evaluated for all scenarios.

Scenario	Contribution		Variations		
	LCA impacts*	LEED v4	LCA impacts		LEED v4
			Energy cons. excluded	Energy cons. included	
S0	53 to 91%	28% (i.e. 13 pts / 46 pts)	n/a	n/a	13 to 33% (i.e. 13 pts / (40 and 110 pts)
S1	54 to 91%		1 to 11%	0 to 8%	
S2	52 to 91%		-4 to 1%	-3 to 1%	
S3	53 to 91%		-1 to 5%	-1 to 3%	
S4	53 to 90%		-15 to 2%	-11 to 1%	
S5	53 to 94%		-38 to 605%	-29 to 406%	
S6	58 to 91%		-18 to 62%	-14 to 46%	

*Excluding Ionizing radiation category, for which material contribution varies by 8 to 10%

3.6 Conclusions

Various Green Building Rating Systems (GBRS) have been proposed to reduce the environmental impact of buildings. However, these GBRS, including LEED v4, are primarily oriented towards energy consumption from the use stage. Their application to situations involving a high share of renewable energy and hence a low impact energy consumption mix can result in unexpected effects. This study aimed: 1) To identify environmental hotspots in an office building, using the LCA methodology in the context of a low environmental impact energy consumption mix; 2) To assess the extent to which the material selection (i.e. different material scenarios) could change environmental impacts; and 3) To compare material contributions to the office building LCA impacts with the MR points attributed by the LEED v4 rating system.

The main results showed that materials could greatly contribute to office building LCA impacts (> 50%) in the context of a low environmental impact energy consumption mix, by comparison with the building use phase. The sensitivity analysis performed for the amount of energy consumption and the impact method suggested the robustness of previous observations. The latter contradicted the contribution of the MR category (28% or 13 points over 33). Moreover, the use of six scenarios defined by multiple material configurations (i.e. four envelope scenarios and two structural scenarios) showed that material selection could greatly affect building LCA impacts (from 0% to more than 50%). These LCA impact variations

exceeded the variations from the LEED v4 perspective, suggesting that further investigation may be warranted to better fit these variations in the case of a building using a low environmental impact energy consumption mix. The second critical assessment referred to the requirements of the “Option 4 in LEED v4: Whole building life cycle assessment” of “Building life cycle impact reduction” optional credit in LEED v4 MR category. None of the 6 scenarios showed a significant environmental impact improvement for the non-LEED v4 categories over the LEED categories. This may suggest that the selected LEED categories are necessary to avoid discrimination of good scenarios. Moreover, only one scenario meeting Option 4 requirements was not totally improving the environmental profile of the base case from an LCA perspective. Hence, further investigations are recommended for building types other than an office building, in addition to performing different uncertainty analysis, to assess the extent to which Option 4 requirements systematically improve building LCA impacts.

The critical assessment of LEED v4 in this study focused only on materials and the associated points. It would be worthwhile extending the study to energy consumption and other building components integrated in LEED v4. It is also worth noting that the selection of the base case scenario can have a significant influence on the results, which also suggests the need for further investigations to delineate the boundaries defining the base case scenario. In addition, this study was based on attributional LCA results and did not consider other indirect environmental impacts. One may consider for instance that by giving more points to the EA category, less energy would be consumed and then less non-renewable energy plants would need to be built in the future. Those avoided (indirect) environmental burdens were not considered in this study and can be more necessary in a context of certification and long-term decision-making when dealing with long life span (at least 50 years in the case of buildings). As they stand, the results presented in this work are useful for a low environmental impact energy consumption mix, such as prevails in the province of Quebec. Despite some discrepancies between building rating systems and LCA, which need to be addressed by all stakeholders in the near future, this paper is a good starting point in improving building environmental impacts.

3.7 Acknowledgements

The authors thank three anonymous reviewers for their very helpful and constructive criticism and their support of the approach taken. The authors are also grateful to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada for its financial support through its ICP and CRD programs (MSc CRD 14) as well as the industrial partners of the NSERC industrial chair on eco-responsible wood construction (CIRCERB). The authors also acknowledge the industrial partners of CIRCERB for their contributions to providing primary data and consequently enhancing the LCA modelling.

3.8 About the Authors.

Yannick Lessard is a master's student with LIRIDE (Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign) at the University of Sherbrooke, Quebec, Canada and with the industrial NSERC Chair CIRCERB.

Chirjiv Anand is a postdoc researcher with LIRIDE (Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign) at the University of Sherbrooke, Quebec, Canada

Pierre Blanchet is professor of secondary manufacturing at Laval University and holder of the NSERC industrial chair on eco-responsible wood construction (CIRCERB).

Caroline Frenette is a technical advisor at the *Centre d'expertise pour la construction commerciale en bois (Cecobois)* and adjunct professor at the department of wood and forest science at Université Laval.

Ben Amor is the head of LIRIDE (Interdisciplinary Research Laboratory on Sustainable Engineering and Ecodesign) and assistant professor at the department of civil engineering at the University of Sherbrooke, Quebec, Canada.

Chapitre 4. Discussion générale

4.1 Informations complémentaires

L'ensemble des résultats et des conclusions du projet de recherche est présenté dans l'article (chapitre 3). Cet article répond à l'objectif principal ainsi qu'aux objectifs spécifiques du projet de recherche présentés au chapitre 2. Toutefois, quelques analyses et informations complémentaires sont présentées aux annexes de ce document afin d'appuyer les résultats et les conclusions de l'étude :

- Annexe A – Informations complémentaires relatives à LEED v4. Les informations présentées dans cette annexe permettent de comprendre davantage comment le système de pointage LEED v4 est construit ;
- Annexe C – *Influences of material selection on building LCA impacts: Critical assessment of LEED v4 (Supplementary information)*. Ce document est associé à l'article présenté au chapitre 3. Il présente quelques analyses complémentaires relatives aux résultats présentés dans l'article ;
- Annexe D – Analyses complémentaires relatives à l'ACV. Quelques analyses complémentaires à l'article (chapitre 3) et à son *Supplementary information* (annexe C) sont présentées dans cette annexe.

Ainsi, les informations présentées dans ces annexes ne représentent pas de nouveaux résultats ou de nouvelles conclusions, mais permettent d'apporter des explications complémentaires à ce qui a été présenté dans l'article.

4.2 Limites et recommandations

En raison de la complexité du système définissant le bâtiment, plusieurs hypothèses ont été nécessaires afin de faciliter la réalisation de l'étude. Toutefois, certaines de ces hypothèses ainsi que certains choix méthodologiques se sont traduits en des limitations aux conclusions de l'étude. Les principales limitations ainsi que certaines recommandations pour les travaux futurs sont donc présentées dans cette section.

4.2.1 Inventaire

Exclusions

Certains intrants associés à l'inventaire ont été exclus de l'analyse. Toutefois, ces intrants ne devraient pas influencer considérablement les conclusions de l'étude. En effet, l'inclusion des intrants relatifs aux matériaux qui ont été exclus, par exemple, pourrait occasionner une augmentation des impacts environnementaux associés aux matériaux. Par conséquent, cette augmentation donnerait encore plus d'importance à la contribution des matériaux aux impacts environnementaux du bâtiment, ce qui va dans la même direction des conclusions obtenues. Il est à noter que l'augmentation des impacts environnementaux des matériaux ou bien l'inclusion des impacts environnementaux de la consommation de diverses ressources par les utilisateurs, pour ne prendre que celle-là, pourraient avoir comme conséquence de diminuer, de façon relative, l'amplitude des variations des impacts environnementaux associées à la sélection de différents matériaux. Ceci est principalement dû à l'augmentation des impacts environnementaux totaux du cycle de vie du bâtiment (section 2.3.2) qui cause une « dilution » de la contribution des impacts environnementaux de chacun des éléments du bâtiment. Cette « dilution » ne devrait pas influencer les conclusions relatives à la comparaison de l'effet des matériaux sur les impacts environnementaux du bâtiment et de la proportion du pointage accordé aux matériaux dans le système de pointage LEED v4. L'influence des exclusions relatives à l'inventaire n'a toutefois pas été estimée de façon quantitative. Voici le sommaire des principaux éléments exclus :

- Un seuil massique minimal de 0,05 % de contribution au poids total du bâtiment a été posé afin de limiter le nombre de matériaux considérés dans le cadre de l'étude, allégeant ainsi considérablement la longueur de l'étude (section 2.3.3 et section 3.4.1). Par conséquent, une certaine quantité de matériaux n'a pas été considérée, ce qui pourrait donner lieu à l'omission d'importants intrants aux impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment étudié [14]. L'utilisation du cuivre pour les circuits électriques du bâtiment en serait un exemple. Malgré leur faible contribution au poids total du bâtiment, le cuivre semble avoir, en excluant les impacts dus à la consommation énergétique, des impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment qui devraient être considérés, soit pouvant être supérieurs à 10 % [8,55,80]. Des études plus détaillées devraient être réalisées dans de futurs travaux afin de

raffiner l'identification des matériaux ayant de grandes contributions aux impacts environnementaux des bâtiments.

- Le bâtiment a été considéré jusqu'à la limite de son enceinte (fondation et enveloppe), c'est-à-dire ce qui constitue le bâtiment en soi. Ainsi, le stationnement et l'aménagement extérieur ont été exclus de l'analyse. Toutefois, il serait intéressant d'évaluer leurs impacts afin d'identifier leurs contributions aux impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment, malgré que leurs impacts semblent être relativement faibles comparativement à ceux de l'ensemble du bâtiment [55,80,81]
- La consommation des ressources et les activités spécifiques des utilisateurs ont été exclues de l'analyse, à l'exception de la consommation énergétique du bâtiment. Une raison de l'exclusion de ces données est relative aux incertitudes élevées qui leur sont généralement associées, attribuable à leur forte dépendance aux comportements des utilisateurs [86]. Bien que l'intégration de ces données à l'analyse complexifie grandement l'étude, cet aspect devrait être davantage étudié dans de futurs travaux afin d'identifier la contribution des utilisateurs, par la consommation de diverses ressources, sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments.

Qualité des données

La qualité des données d'inventaires utilisées pour la modélisation peut influencer directement la fiabilité des résultats et, par conséquent, les conclusions de l'ACV. Afin d'assurer la validité des données utilisées, ces données doivent être sélectionnées conformément au cadre méthodologique défini de l'étude. Présentement, ISO ne prescrit aucune méthode particulière permettant d'évaluer la qualité des données. Toutefois, la modélisation a été effectuée majoritairement en utilisant des données représentatives de la période définie par la frontière temporelle et du contexte géographique dans lequel se trouve le système à l'étude, soit du secteur de la construction du Québec entre les années 2010 et 2015.

Dans le cadre de cette étude, la qualité des données a été évaluée de façon sommaire en fonction de leur fiabilité, soit par les quantités utilisées, et de leur représentativité, soit par les processus utilisés. Afin de déterminer l'importance des niveaux de fiabilité et de représentativité accordés aux différentes données, une analyse de contribution des processus est effectuée parallèlement. Cette analyse de la qualité est présentée à l'annexe D. Ainsi, il est

possible de justifier l'utilisation de données ayant une qualité inférieure dans le cas où ces données composent un processus dont la contribution n'est pas ou peu significative sur l'ensemble du cycle de vie.

Par cette analyse, il est possible de constater qu'un bon nombre des données utilisées pour la modélisation doivent être améliorées, malgré qu'elles soient toutes jugées utilisables dans le cadre de la présente étude. Effectivement, l'unique but d'utiliser l'ACV dans ce projet de recherche est de déterminer le potentiel des matériaux à influencer les impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement. Ce potentiel est utilisé par la suite afin de faire l'évaluation critique de LEED v4 concernant la proportion du pointage accordé aux matériaux comparativement à celui de la consommation énergétique. Si le but des résultats d'ACV n'avait été de comparer que la performance environnementale de différents systèmes constructifs, il aurait probablement été nécessaire d'améliorer la qualité des données utilisées. Ainsi, considérant l'objectif de la présente étude, la qualité des données utilisées est jugée acceptable.

4.2.2 Durée de vie du bâtiment

La durée de vie du bâtiment a été fixée à 50 ans dans le cadre de ce projet de recherche, conformément à ce qui a été considéré lors de la conception du scénario de base. Toutefois, l'*Option 4* du crédit optionnel *Réduction des impacts du cycle de vie du bâtiment* de LEED v4 spécifie que l'ACV du bâtiment doit être réalisée en considérant une durée de vie de 60 ans. Ici, il est supposé que la même quantité de matériaux peut satisfaire autant une durée de vie de 60 ans que de 50 ans. Cette supposition est acceptable en considérant que les quelques remplacements supplémentaires de certains matériaux lors de la phase de rénovation (figure C.1 de l'annexe C) n'auraient qu'une influence négligeable sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Afin de connaître l'effet réel de ces remplacements supplémentaires sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment, il faudrait vérifier les hypothèses concernant la durée de vie considérée pour chacun des matériaux afin de les adapter en fonction d'une durée de vie du bâtiment de 60 ans.

Ceci étant dit, en supposant que la même quantité de matériaux peut satisfaire autant une durée de vie de 60 ans que de 50 ans, la différence principale entre ces deux durées de vie ne

résiderait alors qu'en un changement de quantité d'énergie consommée lors de la phase d'exploitation sur le cycle de vie du bâtiment, soit 10 ans de consommation énergétique. En sachant que la consommation énergétique doit être exclue dans la comparaison de différents scénarios en fonction des exigences de l'*Option 4* du crédit optionnel *Réduction des impacts du cycle de vie du bâtiment* de LEED v4, il est possible de constater que la considération d'une durée de vie de 50 ans ou de 60 ans n'a aucune influence sur les conclusions relatives à ces exigences.

Par contre, pour ce qui est des conclusions relatives à la contribution des matériaux sur les impacts environnementaux des bâtiments ainsi qu'à la comparaison de l'effet de la sélection de matériaux sur les impacts environnementaux du bâtiment et de la considération des matériaux dans le pointage de LEED v4, cette différence de durée de vie est un peu plus significative. Cette différence a été déjà évaluée par l'analyse de sensibilité de la consommation énergétique considérée pour le scénario de base, qui est présenté à la section C.6.2 de l'annexe C. En effet, cette analyse de sensibilité est réalisée en variant la consommation énergétique de $\pm 20\%$ qui est similaire à augmenter la durée de vie de 50 ans à 60 ans ($((60 \text{ ans} - 50 \text{ ans}) / 50 \text{ ans} = 20\%)$). Cette analyse a montré que cette augmentation de consommation énergétique n'influence pas de façon considérable les conclusions de l'étude (section 3.5.1 et section 3.5.2).

4.2.3 Consommation énergétique

Comme il a été mentionné au chapitre 1, l'électricité représente 52 % des sources d'énergie consommée par les bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec, dont le reste de la consommation d'énergie provient en grande partie d'énergies fossiles, soit majoritairement du gaz naturel à 40 % [51]. Étant donné que ce projet de recherche est basé sur l'étude d'un bâtiment à bureaux existant qui consomme exclusivement de l'énergie provenant du réseau électrique d'Hydro-Québec, les conclusions découlant de ce projet ne peuvent être utilisées que pour les bâtiments commerciaux situés au Québec consommant la même source d'énergie. Il serait donc intéressant d'étudier dans de futurs travaux l'influence sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments la consommation d'autres sources d'énergie lors de leur exploitation afin de déterminer si les conclusions relatives à la comparaison de la

distribution du pointage dans LEED v4 et des points chauds des impacts environnementaux de ces bâtiments demeurent similaires dans ces conditions.

La consommation énergétique des scénarios alternatifs a été supposée la même que celle du scénario de base (chapitre 3). Autrement dit, il est supposé que le changement de la configuration de matériaux du scénario de base en fonction de chacun des scénarios alternatifs n'a aucune incidence sur l'efficacité énergétique du bâtiment. Pour s'assurer que cette considération n'affecte pas les conclusions de l'étude, une analyse de sensibilité a été réalisée sur la quantité d'énergie nécessaire lors de la phase d'exploitation du bâtiment (chapitre 3). Par contre, aucune modélisation énergétique n'a été réalisée pour valider cette hypothèse. Pour de futurs travaux, il serait donc intéressant d'évaluer la sélection des matériaux en fonction de leurs effets sur la consommation énergétique des bâtiments. Ainsi, il serait possible d'évaluer l'effet réel de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments autant d'un point de vue de la consommation énergétique du bâtiment que de celui des impacts environnementaux globaux.

La relation entre la performance des matériaux, autre que la mécanique du bâtiment, et l'efficacité énergétique du bâtiment est importante afin d'obtenir un niveau donné d'efficacité énergétique. La performance des matériaux peut être principalement d'ordre thermique (capacité isolante, masse thermique, etc.) et physique (étanchéité à l'air, à l'eau et à l'humidité, réflectance, etc.). Cette performance peut varier dans le temps et souvent diminue en fonction du temps. La variation de la performance des matériaux peut donc avoir une influence considérable sur l'efficacité énergétique du bâtiment, et par conséquent sur les impacts environnementaux de celui-ci. Toutefois, cette influence n'a pas été évaluée et est même très peu étudiée actuellement. Il serait donc intéressant d'évaluer cette influence afin d'identifier l'effet réel de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux des bâtiments.

4.2.4 Analyse des incertitudes

Malgré qu'il n'y ait pas eu d'analyse des incertitudes par la méthode Monte-Carlo pour ce projet, une telle analyse serait pertinente à réaliser dans de futurs travaux afin de valider les conclusions de l'étude. Des analyses de sensibilité sur certains éléments ont été toutefois

réalisées afin de tester la sensibilité des valeurs considérées sur les conclusions de l'étude. Ces analyses de sensibilité sont présentées aux annexes C et D :

- Influence de la méthode d'analyse d'impacts sur les résultats obtenus en utilisant la méthode TRACI 2.1 au lieu d'IMPACT 2002+ pour :
 - l'ACV du scénario de base (section C.6.1.1) ;
 - l'évaluation de la variation des impacts environnementaux due à la sélection de matériaux en comparant les résultats d'ACV des scénarios alternatifs à ceux du scénario de base (section C.6.1.2) ;
- Influence de la quantité d'énergie consommée considérée, en variant cette quantité de $\pm 20\%$, sur la contribution des matériaux aux impacts environnementaux du cycle de vie :
 - du scénario de base (figure C.6.2) ;
 - de chaque scénario alternatif en comparaison aux résultats initialement obtenus du scénario de base (tableau C.6.2) ;
- Influence de la durée de vie du bâtiment sur les résultats d'ACV du scénario de base (section D.2) ;
- Influence de la fin de vie des matériaux sur les résultats d'ACV du scénario de base (annexe C).

Il a été démontré que les variables concernées dans chacune de ces analyses de sensibilités, soit la méthode d'EICV utilisée, la quantité d'énergie consommée par le bâtiment, la durée de vie considérée du bâtiment et le type de fin de vie des matériaux, n'ont pas d'effet majeur sur les conclusions de l'étude.

4.2.5 Choix méthodologique concernant l'ACV réalisée

Comme il a été expliqué au chapitre 3, cette étude se base sur une ACV-A. Toutefois, l'approche conséquentielle serait intéressante à explorer afin d'évaluer les conséquences environnementales occasionnées par la sélection de certains matériaux plutôt que d'autres, qui ne sont pas évaluées par l'ACV-A et LEED v4. Ceci est dû au fait que l'ACV-A évalue les impacts environnementaux selon des relations physiques des flux entre les divers produits et processus. Ainsi, une étude similaire à celle présentée dans ce document, réalisée selon une approche conséquentielle, serait très pertinente. Comme il a été mentionné au chapitre 1,

l'ACV-C permet d'évaluer les conséquences environnementales de changements appliqués à un produit d'un point de vue macroscopique, c'est-à-dire du marché, en analysant les flux économiques liés au produit. L'influence de la sélection des matériaux dans le secteur du bâtiment dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement, comme la consommation de l'électricité provenant du réseau électrique du Québec, pourrait ainsi être évaluée afin de généraliser les conclusions qui pourraient en découler. Ceci permettrait, entre autres, d'orienter la mise en place de certaines politiques gouvernementales vers des solutions réduisant réellement les impacts environnementaux sur le cycle de vie des bâtiments dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement, et ce, tout en évitant qu'il ne résulte de ces changements que de simples déplacements d'impacts. De plus, les conséquences de la conversion totale de l'ensemble des bâtiments commerciaux à l'énergie provenant du réseau électrique d'Hydro-Québec par une ACV-C seraient intéressantes à évaluer. Ceci permettrait d'apporter certaines réponses concernant la viabilité d'un tel scénario d'un point de vue autant technique qu'environnemental.

4.2.6 Évaluation du système de pointage de LEED v4

Le système de pointage de LEED v4 a été évalué principalement en fonction de la proportion du pointage accordé aux matériaux. Ceci veut donc dire que l'influence de l'application directe des exigences de LEED v4 sur la sélection des matériaux, et par conséquent sur les impacts environnementaux du bâtiment par cette sélection, n'a pas été évaluée. En fait, cette évaluation sort du cadre de l'étude. Toutefois, cette évaluation serait pertinente dans le cadre de futurs travaux afin d'identifier les éléments clés du système de pointage affectant majoritairement la sélection des matériaux, et par conséquent les impacts environnementaux des bâtiments associés à cette sélection.

Même si cette évaluation sort du cadre du présent projet, deux pistes d'éléments clés, qui ont été identifiées au courant de l'étude, sont présentées à l'annexe E. Ces deux pistes ont été évaluées selon le même cadre du présent projet de recherche et en fonction de ce qui se retrouve déjà dans LEED v4. Ces pistes concernent :

- l'influence de la distance de transport des matériaux de construction en fonction de leur poids sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments ;

- l'influence de la réduction des déchets de construction en fonction du type de matériau sur les impacts environnementaux du cycle de vie des bâtiments.

4.2.7 Évaluer d'autres certifications

La présente étude s'est limitée seulement à l'étude de la certification LEED v4. Toutefois, il serait intéressant d'évaluer l'influence des autres certifications, telles que Living Building Challenge, Passive House et BREEAM, sur la sélection des matériaux et, conséquemment, sur les impacts environnementaux des bâtiments selon un cas similaire à celui qui a été étudié. Même si certaines certifications portent principalement sur la consommation énergétique du bâtiment, il va sans dire que certaines pratiques permettant d'arriver à une meilleure efficacité énergétique passent par la sélection de matériaux. Ainsi, l'influence de la sélection des matériaux sur les impacts environnementaux du bâtiment et l'influence de cette sélection sur la consommation énergétique du bâtiment pourraient être évaluées conjointement. Cette évaluation aiderait à mieux comprendre les interactions entre la sélection des matériaux, la consommation énergétique et leurs contributions aux impacts environnementaux sur le cycle de vie des bâtiments.

Chapitre 5. Contributions du projet de recherche

Malgré le grand nombre d'études évaluant les impacts environnementaux dans le secteur du bâtiment, il n'y a pas d'études qui ont été identifiées lors de la revue de la littérature qui évaluent, à la fois, les points chauds du profil environnemental des bâtiments, ces impacts en fonction d'une consommation énergétique du bâtiment occasionnant de faibles impacts sur l'environnement, le potentiel de variation de ces impacts en fonction de la sélection de différents matériaux et la relation des exigences des certifications avec ces impacts. Le projet de recherche présenté dans ce document contribue, par ses résultats, à aider à combler ce vide dans la littérature. De plus, c'est le premier projet de recherche de ce genre au Québec.

En montrant la grande influence que peuvent avoir les matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment, ce projet repositionne les efforts que doivent mettre les différents acteurs de l'industrie de la construction afin d'orienter leurs pratiques actuelles vers des pratiques permettant de réduire de façon efficace les impacts environnementaux des bâtiments. Cette nouvelle orientation vers la sélection des matériaux est nécessaire dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement, car les pratiques actuelles sont orientées davantage sur la réduction de la consommation énergétique du bâtiment.

Par la même occasion, ce projet de recherche démontre que l'ACV est un outil efficace pour optimiser les impacts environnementaux dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement, ce qui n'est pas nécessairement le cas de LEED v4. Étant donné que cette optimisation doit se faire principalement en fonction de la sélection des matériaux selon un tel cas, ce projet permet de mettre en évidence certaines lacunes de LEED v4 et aide à mieux cerner l'orientation que cette certification devrait prendre afin d'améliorer son système de pointage en conséquence. Comme l'ont proposé d'autres auteurs [5,9], il a été montré qu'il serait intéressant de commencer à intégrer une notion d'adaptabilité au système de pointage de LEED v4 afin de répondre aux besoins spécifiques des bâtiments en fonction du contexte dans lequel ils se situent.

Pour terminer, outre l'ensemble des résultats et des conclusions en soi qui résultent de ce projet de recherche, leurs présentations dans des événements portant sur les thématiques à l'étude ont permis de mettre en valeur la contribution de ce projet de recherche par leurs

diffusions. Les événements avec un comité de lecture dans lesquels a été présenté le projet de recherche sont :

1. Lessard, Y., Anand, C., Blanchet, P., Frenette, C., and Amor, B. 2016. Effect of material choices on building life cycle environmental impacts: Critical assessment of LEED v4 certification. Présentation orale. LCA XVI conference, Charleston, États-Unis. 27-29 septembre 2016.
2. Lessard, Y., Blanchet, P., Frenette, C., and Amor, B. 2016. Effet du choix des matériaux sur le profil environnemental d'un bâtiment et sur le pointage de la certification LEED v4. Présentation orale. CYCLE 2016, Montréal, Canada. 13-14 octobre 2016.
3. Lessard, Y., Frenette, C., Blanchet, P., et Amor, B. 2016. Effet du choix des matériaux sur le profil environnemental d'un Bâtiment en fonction de la certification LEED v4. Présentation orale. ACFAS, Colloque La construction biosourcée : Contexte, matériaux et systèmes, Montréal, Canada. 10 mai 2016.
4. Lessard, Y., Blanchet, P., Frenette, C., and Amor, B. 2015. Environmental life cycle impacts and LEED scores variations as a function of material choices - The Case of a real scale commercial building. Présentation orale. LCA XV conference, Vancouver, Canada. 6-8 octobre 2015.
5. Lessard, Y., Anand, C., and Amor, M. B. (2015). 2015. Environmental Performance of Green Building Certification Systems. Affiche. 7th International Conference on Life Cycle Management, Bordeaux, France. 30 août – 2 septembre 2015.
6. Lessard, Y., Frenette, C., Blanchet, P., and Amor, B. 2015. Profil environnemental du cycle de vie des bâtiments : Orientation matériaux. Présentation orale. Colloque interfacultaire des cycles supérieurs, Sherbrooke, Canada. 19 mars 2014.
7. Lessard, Y., Frenette, C., Blanchet, P., and Amor, M. B. 2014. Environmental Performance of Green Building Certification Systems. Présentation orale. LCA XIV Conference, San Francisco, États-Unis. 6-8 octobre 2014.
8. Lessard, Y., Amor, M. B., Frenette, C. and Blanchet, P. 2014. Modélisation de l'impact environnemental sur le cycle de vie d'un bâtiment résidentiel réel en le conformant à

trois différentes certifications. Affiche. 13e édition de la Journée de la recherche, Sherbrooke, Canada. 13 février 2014.

Conclusion

Le secteur du bâtiment se compte parmi les grands contributeurs aux impacts environnementaux engendrés par les activités anthropiques. La considération des bâtiments dans les actions à prendre afin de réduire globalement ces impacts s'avère donc être un incontournable. Afin d'aider à réduire les impacts environnementaux des bâtiments, certains systèmes de certification sont mis à la disposition des diverses parties prenantes de ce secteur. Toutefois, l'efficacité de ces systèmes de certification dans cette optique dépend du contexte dans lequel ils sont appliqués.

Ainsi, l'objectif principal de ce projet de recherche était de déterminer la relation entre la considération des matériaux dans le système de pointage de LEED v4 et le potentiel de la sélection des matériaux à faire varier les impacts environnementaux des bâtiments dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement. La réussite de cet objectif fait suite à l'atteinte des trois objectifs spécifiques de projet, comme il a été défini au chapitre 2.

Premièrement, la modélisation du cycle de vie d'un bâtiment à bureaux réel situé au Québec par l'entremise d'une ACV a permis d'identifier les points chauds de ses impacts environnementaux. Cette analyse a permis de démontrer que les matériaux peuvent contribuer à plus de 50 % aux impacts environnementaux du bâtiment dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement.

Deuxièmement, différents scénarios alternatifs ont été élaborés afin d'évaluer l'effet de la sélection de divers matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du scénario de base. Ces scénarios alternatifs ont résulté de la modification de quelques configurations de matériaux du scénario de base. En se basant sur les résultats obtenus de l'ACV du scénario de base, les murs extérieurs, faisant partie de l'enveloppe du bâtiment, et la structure principale ont été sélectionnés dans l'optique d'élaborer les six scénarios alternatifs présentés dans l'étude. Ainsi, la configuration des murs extérieurs du scénario de base a été modifiée selon quatre scénarios alternatifs et celle de la structure principale, selon deux scénarios alternatifs. La comparaison des résultats des ACV de ces six scénarios alternatifs aux résultats du scénario de base a permis de déterminer un ordre de grandeur des variations des impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment pouvant être engendrées par la sélection des

matériaux. Ainsi, ces variations obtenues, soit de 0 % à plus de 50 %, ont montré que la sélection de matériaux pouvait influencer considérablement les impacts environnementaux des bâtiments dans le cas où l'énergie consommée occasionne de faibles impacts sur l'environnement, soit l'énergie provenant du réseau électrique du Québec pour le cas à l'étude (où l'électricité produite est principalement de source hydraulique).

Finalement, le système de pointage de LEED v4 a été analysé afin d'identifier les critères pouvant influencer directement la sélection des matériaux. Il s'est révélé que la majorité d'entre eux sont principalement regroupés dans la catégorie *Matériaux et ressources* de la certification. Le pointage accordé à cette catégorie représente 10 % du pointage total disponible dans LEED v4, soit 13 points sur les 110 disponibles. Cette proportion du pointage accordé aux matériaux dans LEED v4, comparativement à celle accordée à la consommation énergétique, a été comparée à l'effet des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment mentionné précédemment. Cette comparaison a démontré que les matériaux peuvent être sous-représentés dans le système de pointage de LEED v4 dans le cas où l'énergie consommée par le bâtiment occasionne de faibles impacts sur l'environnement.

Tout au long de ce projet de recherche, certaines limitations de l'étude ont été soulevées :

- 1) l'exclusion de certains éléments de l'inventaire pourrait donner lieu à l'omission d'importants intrants aux impacts environnementaux sur le cycle de vie du bâtiment étudié,
- 2) aucune modélisation énergétique n'a été réalisée à la suite des changements de configuration de matériaux du scénario de base pour élaborer les différents scénarios alternatifs,
- 3) certaines analyses conformément aux normes ISO 14040-44 n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude et
- 4) LEED v4 n'a été évalué que sur la base de la distribution de son pointage, et non sur l'influence de ses critères sur les impacts environnementaux du bâtiment. De plus, dû au fait que ces résultats ont été obtenus selon une approche attributionnelle plutôt que conséquentielle, il n'est pas possible d'évaluer les impacts environnementaux dus à un changement important de la dynamique du marché actuel.

Toutefois, certaines de ces limitations ont été appuyées par certaines analyses afin de limiter leurs impacts sur les conclusions obtenues.

En terminant, ces travaux contribuent à aider à combler un vide dans la littérature concernant l'influence des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie d'un bâtiment qui

consomme de l'énergie occasionnant de faibles impacts sur l'environnement ainsi que sur la considération des matériaux dans les certifications pour le bâtiment. Cette démonstration permet ainsi d'aider à repositionner les efforts des différents acteurs de l'industrie de la construction dans l'optique de réduire de façon efficace les impacts environnementaux des bâtiments ayant une consommation énergétique spécifique, telle que celle du cas à l'étude.

Bibliographie

- [1] Zabalza Bribián I, Capilla AV, Usón AA. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46, 5, p. 1133–40.
- [2] Industry Canada. (2013). *Corporate Social Responsibility: Buildings*. Government of Canada. <http://www.ic.gc.ca/eic/site/csr-rse.nsf/eng/rs00585.html> (consulté le 13 mai 2015)
- [3] Martínez-Rocamora A, Solís-Guzmán J, Marrero M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, p. 565–73.
- [4] Buyle M, Braet J, Audenaert A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, p. 379–88.
- [5] Suzer O. (2015). A comparative review of environmental concern prioritization: LEED vs other major certification systems. *Journal of environmental management*, 154, p. 266–83.
- [6] Ortiz O, Castells F, Sonnemann G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23, 1, p. 28–39.
- [7] Chau CK, Leung TM, Ng WY. (2015). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143, p. 395–413.
- [8] Mosteiro-Romero M, Krogmann U, Wallbaum H, Ostermeyer Y, Senick JS, Andrews CJ. (2014). Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts. *Energy and Buildings*, 68, p. 620–31.
- [9] Al-Ghamdi SG, Bilec MM. (2015). Life-Cycle thinking and the LEED rating system: Global perspective on building energy use and environmental impacts. *Environmental Science & Technology*, 49, 7, p. 4048–56.

- [10] Blengini GA, Di Carlo T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings. *Energy and Buildings*, 42, 6, p. 869–80.
- [11] USGBC. (2013). *LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction*. <http://www.usgbc.org/articles/usgbc-membership-says-yes-leed-v4> (consulté le 27 avril 2016).
- [12] Fava JA. (2006). Will the Next 10 Years be as Productive in Advancing Life Cycle Approaches as the Last 15 Years? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 1, p. 6–8.
- [13] ISO. (2006). ISO 14040 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. Suisse, 20 p.
- [14] ISO. (2006). ISO 14044 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. Suisse, 46 p.
- [15] ISO. (2003). ISO 14047 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples d'application d'ISO. Suisse, 87 p.
- [16] ISO. (2000). ISO 14049 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exemples d'application d'ISO. Suisse, 43 p.
- [17] Jolliet O, Saadé M, Crettaz P, Shaked S. (2010). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. 2e édition. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 302 p.
- [18] Schenck RC, Malin N, Trusty W, Horst S, Fava J a., Bare J, et al. (2005). Life Cycle Assessment and Sustainability. *Building Design and Construction*, November 2005, 62 p.
- [19] Curran MA, editor. (2015). *Life cycle assessment student handbook*. Scrivener Publishing, Salem, États-Unis, 299 p.
- [20] Jolliet O, Saadé M, Shaked S, Jolliet A, Crettaz P. (2016). *Environmental life cycle assessment*. Taylor & Francis, Boca Raton, États-Unis, 295 p.
- [21] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD)*

Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. 1^{ère} édition. EUR 24708 EN. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 398 p.

- [22] Takano A, Hafner A, Linkosalmi L, Ott S, Hughes M, Winter S. (2015). Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73, 3, p. 299–312.
- [23] Srinivasan RS, Ingwersen W, Trucco C, Ries R, Campbell D. (2014). Comparison of energy-based indicators used in life cycle assessment tools for buildings. *Building and Environment*, 79, p. 138–51.
- [24] Jonsson A, Bjorklund T, Tillman A-M. (1998). LCA of concrete and steel building frames. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3, 4, p. 216–24.
- [25] Takano A, Winter S, Hughes M, Linkosalmi L. (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment*, 79, p. 20–30.
- [26] Lesage P, Samson R. (2013). The Quebec Life Cycle Inventory Database Project. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 9, p. 1–8.
- [27] Wernet G, Bauer C, Steubing B, Reinhard J, Moreno-Ruiz E, Weidema B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 9, p. 1218–1230.
- [28] Haapio A, Viitaniemi P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 28, 7, p. 469–82.
- [29] Islam H, Jollands M, Setunge S. (2015). Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, p. 129–40.
- [30] Pennington DW, Margni M, Amman C, Jolliet O. (2005). Multimedia Fate and Human Intake Modeling: Spatial versus Non-Spatial Insights for Chemical Emissions in Western Europe. *Environmental Science & Technology*, 4, 39, p. 1119–28.
- [31] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, et al. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8, 6, p. 324–30.

- [32] U.S. EPA. (2014). *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI)*. <http://www.epa.gov/nrmrl/std/traci/traci.html> (consulté le 28 mai 2015).
- [33] Bare J, Norris GA, Pennington DW. (2003). TRACI - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 6, 3, p. 49–78.
- [34] Zabalza Bribián I, Aranda Usón A, Scarpellini S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44, p. 2510–20.
- [35] Anand C, Amor B. (2016). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (accepté), p. 16.
- [36] Abd Rashid AF, Yusoff S. (2015). A review of life cycle assessment method for building industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, p. 244–8.
- [37] Wittstock B, Gantner J, Saunders KLT, Anderson J, Carter C, Gyetvai Z, et al. (2012). *EeBGuide Guidance Document Part B: BUILDINGS. Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative*. <http://www.eebguide.eu>. (consulté le 10 janvier 2016).
- [38] BSI. (2011). BS EN 15978 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. London, 64 p.
- [39] Cecobois. (2015). *L'avantage environnemental des systèmes de construction en bois dans le contexte des changements climatiques*. Centre d'expertise sur la construction commerciale en bois, Québec, Canada, 7 p.
- [40] Alain S. (2015). *Évaluation d'outils d'analyse du cycle de vie pour étudier la performance environnementale de bâtiments en bois innovants*. Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Québec, Canada, 122 p.
- [41] Cabeza LF, Rincón L, Vilariño V, Pérez G, Castell A. (2013). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, p. 394–416.

- [42] Zhang W, Tan S, Lei Y, Wang S. (2014). Life cycle assessment of a single-family residential building in Canada: A case study. *Building Simulation*, 7, p. 429–38.
- [43] Silvestre JD, De Brito J, Pinheiro MD. (2014). Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - Calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 66, p. 37–45.
- [44] Ramesh T, Prakash R, Shukla KK. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy and Buildings*, 42, 10, p. 1592–600.
- [45] Quantis, Earth Advantage and Oregon Home Builders Association. (2009). *A life cycle assessment based approach to prioritizing methods of preventing waste from residential building construction, remodeling, and demolition in the State of Oregon. Phase 1 Report, Version 1.2*. Oregon Department of Environmental Quality. Oregon, États-Unis, 71 p.
- [46] Gustavsson L, Joelsson A. (2010). Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*, 42, 2, p. 210–20.
- [47] Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, p. 73–89.
- [48] Pajchrowski G, Noskowiak A, Lewandowska A, Strykowski W. (2014). Materials composition or energy characteristic - What is more important in environmental life cycle of buildings? *Building and Environment*, 72, p. 15–27.
- [49] Whitmore J, Pineau P-O. (2015). *État de l'énergie au Québec - 2016*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, Montréal, Canada, 39 p.
- [50] Hydro-Québec. (2014). *Production, achats et ventes d'électricité*. <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/energie-environnement/production-achats-et-ventes-electricite.html> (consulté le 1^{er} mai 2015)
- [51] Office de l'efficacité énergétique. (2015). *Base de données nationale sur la consommation d'énergie*. Ressources naturelles Canada. Gouvernement du Canada. <http://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/accueil.cfm?attr=0> (consulté le 8 janvier 2017)

- [52] Takano A, Pal SK, Kuittinen M, Alanne K, Hughes M, Winter S. (2015). The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. *Building and Environment*, 89, p. 192–202.
- [53] Thiel CL, Campion N, Landis AE, Jones AK, Schaefer L a., Bilec MM. (2013). A materials life cycle assessment of a net-zero energy building. *Energies*, 6, p. 1125–41.
- [54] Proietti S, Sdringola P, Desideri U, Zepparelli F, Masciarelli F, Castellani F. (2013). Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. *Energy and Buildings*, 64, p. 463–72.
- [55] Junnila S, Horvath A. (2003). Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building. *Journal of Infrastructure Systems*, 9, 4, p. 157–66.
- [56] Kofoworola O, Gheewala S. (2008). Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 13, 6, p. 498–511.
- [57] Kofoworola OF, Gheewala SH. (2009). Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy and Buildings*, 41, 10, p. 1076–83.
- [58] Fouquet M, Levasseur A, Margni M, Lebert A, Lasvaux S, Souyri B, et al. (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90, July, p. 51–9.
- [59] Pargana N, Pinheiro MD, Silvestre JD, de Brito J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*, 82, p. 466–81.
- [60] Takano A, Hughes M, Winter S. (2014). A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Building and Environment*, 82, p. 526–35.
- [61] Sierra-Pérez J, Boschmonart-Rives J, Gabarrell X. (2016). Environmental assessment of façade-building systems and thermal insulation materials for different climatic conditions. *Journal of Cleaner Production*, 113, p. 102–13.
- [62] Dean S, Marceau M, VanGeem M. (2006). Comparison of the Life Cycle Assessments

of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House. *Journal of ASTM International*, 3, 9, p. 13637.

- [63] Rincón L, Castell A, Pérez G, Solé C, Boer D, Cabeza LF. (2013). Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 109, p. 544–52.
- [64] Collinge WO, Thiel CL, Champion NA, Al-Ghamdi SG, Woloschin CL, Soratana K, et al. (2015). Integrating Life Cycle Assessment with Green Building and Product Rating Systems: North American Perspective. *Procedia Engineering*, 118, p. 662–9.
- [65] Chew MYL, Das S. (2008). Building Grading Systems: A Review of the State-of-the-Art. *Architectural Science Review*, 51, 1, p. 3–13.
- [66] Lee WL. (2013). A comprehensive review of metrics of building environmental assessment schemes. *Energy and Buildings*, 62, p. 403–13.
- [67] USGBC. *About USGBC*. <http://www.usgbc.org/about>. (consulté le 1^{er} mai 2015).
- [68] CBDCa. *Verdir avec LEED*. http://www.cagbc.org/CBDCA/Programmes/LEED/VerdiravecLEED/CBDCaSiteWeb/Programmes/LEED/Verdir_avec_LEED.aspx. (consulté le 1^{er} mai 2015).
- [69] CaGBC. *LEED v4*. http://www.cagbc.org/CAGBC/LEED/LEEDv4/CAGBC/Programs/LEED/LEEDv4/LEED_v4.aspx. (consulté le 1^{er} mai 2015).
- [70] Richards J. (2012). *Green Building: A Retrospective on the History of LEED Certification*. Institute for environmental entrepreneurship, Berkeley, États-Unis, 6 p.
- [71] USGBC. (2014). *LEED v4 - User Guide*. U.S. Green Building Council, États-Unis, 66 p.
- [72] USGBC. (2014). *Reference guide for building design and construction*. U.S. Green Building Council, Washington, États-Unis, 807 p.
- [73] Suh S, Tomar S, Leighton M, Kneifel J. (2014). Environmental performance of green building code and certification systems. *Environmental Science & Technology*, 48, p. 2551–60.

- [74] Alshamrani OS, Galal K, Alkass S. (2014). Integrated LCA-LEED sustainability assessment model for structure and envelope systems of school buildings. *Building and Environment*, 80, p. 61–70.
- [75] Humbert S, Abeck H, Bali N, Horvath A. (2007). Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) - A critical evaluation by LCA and recommendations for improvement. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12, Special Issue 1, p. 46–57.
- [76] Scheuer CW, Keoleian G a. (2002). *Evaluation of LEED Using Life Cycle Assessment Methods*. Center for Sustainable Systems, University of Michigan, Ann Arbor, États-Unis, 157 p.
- [77] Athena Sustainable Materials Institute. *IE for Buildings*. <http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/> (consulté le 20 avril 2016).
- [78] Bekker PCF. (1982). A life-cycle approach in building. *Building and Environment*, 17, 1, p. 55–61.
- [79] CaGBC. (2014). 2014 Annual Report. Dans *CaGBC Corporate Reports*. http://www.cagbc.org/cagbcdocs/aboutcagbc/CaGBC_15_Annual_Report_Layout_English_72DPI_Web.pdf (consulté le 4 avril 2016).
- [80] Chau CK, Yik FWH, Hui WK, Liu HC, Yu HK. (2007). Environmental impacts of building materials and building services components for commercial buildings in Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 15, 18, p. 1840–51.
- [81] Ortiz O, Pasqualino JC, Díez G, Castells F. (2010). The environmental impact of the construction phase: An application to composite walls from a life cycle perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 11, p. 832–40.
- [82] Guardigli L, Monari F, Bragadin MA. (2011). Assessing Environmental Impact of Green Buildings through LCA Methods: A comparison between Reinforced Concrete and Wood Structures in the European Context. *Procedia Engineering*, 1199–206 p.
- [83] Xing S, Xu Z, Jun G. (2008). Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. *Energy and Buildings*, 40, 7, p. 1188–93.
- [84] ecoinvent Centre. (2016). *The ecoinvent Database*.

<http://www.ecoinvent.org/database/database.html> (consulté le 8 mai 2016).

- [85] ecoinvent Centre. (2016). *Allocation cut-off by classification*. <http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html> (consulté le 15 mars 2016).
- [86] di Sorrentino E, Woelbert E, Sala S. (2016). Consumers and their behavior: state of the art in behavioral science supporting use phase modeling in LCA and ecodesign. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 2, p. 237–51.
- [87] Chaire internationale sur le cycle de vie. (2014). *Rapport technique - Analyse du cycle de vie de tasses réutilisables et de gobelets à café à usage unique*. Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services, Montréal, Canada, 89 p.

ANNEXE A – Informations sur les GBRS

A.1 Informations générales

Tableau A.1. Informations générales sur quelques GBRS existants dans le monde

Certification	Institution	Provenance	Dernière version	Catégories évaluées
BREEAM	Building Research Establishment (BRE)	Royaume-Uni	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Energy • Health and wellbeing • Innovation • Land use • Materials • Management • Pollution • Transport • Waste • Water
LEED	United States Green Building Council (USGBC)	États-Unis	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Location and transportation • Sustainable sites • Water efficiency • Energy and atmosphere • Materials and resources • Indoor environmental quality • Innovation
SBTool	International Initiative for a Sustainable Built Environment (iisBE)	Regroupement de pays	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Location, Services and Site Characteristics • Site Regeneration and Development, Urban Design and Infrastructure • Energy and Resource Consumption • Environmental Loadings • Indoor Environmental Quality • Service Quality • Social, Cultural and Perceptual Aspects • Cost and Economic Aspects
CASBEE	Japan GreenBuild Council (JaGBC), Japan Sustainable Building Consortium (JSBC), Institute for Building Environment and Energy Conservation (IBEC)	Japon	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental quality <ul style="list-style-type: none"> ○ Indoor environment ○ Quality of service ○ Outdoor environment • Environmental load <ul style="list-style-type: none"> ○ Energy ○ Ressources and materials ○ Off-site environment

Tableau A.1. Informations générales sur quelques GBRS existants dans le monde (Suite)

Certification	Développeur	Provenance	Dernière version	Catégories évaluées
Green Star	Green Building Council of Australia (GBCA)	Australie	2015	<ul style="list-style-type: none"> • Management • Indoor environment quality • Energy • Transport • Water • Materials • Land use and ecology • Emissions • Innovation
Passive House	Passive house Institute (PHI)	Allemagne	n/a	<ul style="list-style-type: none"> • Energy
Haute qualité environnementale (HQE)	Association HQE	France	2016	<ul style="list-style-type: none"> • Énergie <ul style="list-style-type: none"> ○ Énergie • Environmental <ul style="list-style-type: none"> ○ Site ○ Composants ○ Chantier ○ Eau ○ Déchets ○ Entretien-Maintenance • Santé <ul style="list-style-type: none"> ○ Qualité des espaces ○ Qualité de l'air ○ Qualité de l'eau • Confort <ul style="list-style-type: none"> ○ Confort hygrothermique ○ Confort acoustique ○ Confort visuel ○ Confort olfactif
LBC	International Living Future Institute (ILFI)	États-Unis	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Place • Water • Energy • Health and happiness • Materials • Equity • Beauty

A.2 Informations complémentaires relatives à LEED v4

Les prérequis et les crédits optionnels des neuf catégories définissant LEED v4 sont présentés dans cette annexe. Chacune de ces catégories est présentée dans une section distincte de cette annexe. De plus, quelques informations supplémentaires concernant les types d'influence que peuvent avoir les prérequis et les crédits optionnels sur la sélection des matériaux y sont aussi brièvement présentées. Ici, les exigences associées aux prérequis et aux crédits optionnels dans LEED v4 pouvant influencer directement et indirectement la sélection des matériaux ont été identifiées de façon distincte. De façon générale, comme il a été mentionné à la section 3.4.3, les prérequis et les crédits optionnels influençant directement la sélection des matériaux se trouvent dans la catégorie *Matériaux et ressources*. Les autres exigences influençant la sélection des matériaux, mais cette fois-ci, plus indirectement, se trouvent dans les autres catégories de LEED v4. Qu'elles aient des influences directes ou indirectes, certaines de ces exigences peuvent influencer la sélection des matériaux en fonction :

- d'une phase spécifique de leurs cycles de vie ;
- de la gestion et/ou de la planification leur étant associée ;
- de leurs fonctionnalités et/ou emplacements dans le bâtiment ;
- de leurs impacts environnementaux et/ou émissions dans l'environnement.

Les principaux types d'influence que peuvent avoir les exigences de LEED v4 sont listés au tableau A.2. Les acronymes inscrits à la colonne de droite de ce tableau permettent de référencer les types d'influence inscrits aux tableaux des sections suivantes.

Tableau A.2. Types d'influence que peuvent avoir les exigences de LEED v4 sur la sélection des matériaux.

	Acronyme
Phase du cycle de vie	
Extraction des matières premières	PE
Production	PP
Construction	PC
Rénovation	PR
Transport	PT
Fin de vie	PF
Gestion / Planification	
Gestion / Planification	GP
Fonctionnalités et/ou emplacement dans le bâtiment	
Stationnement	FS
Toiture	FT
Isolation	FI
Confort (thermique, visuelle, acoustique)	FC
Impacts environnementaux et/ou émissions dans l'environnement	
Composé organique volatil (COV)	COV
ACV	ACV
Certification et/ou déclaration environnementales	CDE
Réutilisation d'un bâtiment ou d'une partie de bâtiment	R

Catégorie - *Processus intégré*

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
PRÉREQUIS			
Planification et conception de projet intégrées	N/A	N/A	N/A
CRÉDITS OPTIONNELS			
Processus intégré	1	I	FI, FC

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - Emplacement et transport

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
CRÉDITS OPTIONNELS			
Emplacement LEED pour l'aménagement des quartiers	16	-	-
Protection des terrains sensibles	1	-	-
Site hautement prioritaire	2	-	-
Densité des environs et utilisations diversifiées	5	-	-
Accès à un réseau de transport en commun de qualité	5	-	-
Installations pour bicyclettes	1	-	-
Réduction de la superficie au sol du terrain de stationnement	1	I	FS
Véhicules écologiques	1	-	-

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - Aménagement écologique des sites

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
PRÉREQUIS			
Prévention de la pollution pendant la construction	-	-	-
Évaluation environnementale du site	N/A	N/A	N/A
CRÉDITS OPTIONNELS			
Évaluation du site	1	-	-
Aménagement du site – Protéger ou restaurer les habitats naturels	2	-	-
Espaces ouverts	1	-	-
Gestion des eaux pluviales	3	-	-
Réduction des îlots de chaleur	2		
<i>Opt. 1. Toitures et éléments autres que les toitures</i>	2	I	FS, FT
<i>Opt. 2 Stationnement couvert</i>	1	I	FS, FT
Réduction de la pollution lumineuse	1	-	-
Plan d'ensemble du site	N/A	N/A	N/A
Lignes directrices pour la conception et la construction à l'intention des locataires	N/A	N/A	N/A
Lieux de soins de relève	N/A	N/A	N/A
Accès direct à l'extérieur	N/A	N/A	N/A
Utilisation conjointe des installations	N/A	N/A	N/A

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - Gestion efficace de l'eau

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
PRÉREQUIS			
Réduction de la consommation d'eau à l'extérieur	-	-	-
Réduction de la consommation d'eau à l'intérieur	-	-	-
Comptage de l'eau à l'échelle du bâtiment	-	-	-
CRÉDITS OPTIONNELS			
Réduction de la consommation d'eau à l'extérieur	2	-	-
Réduction de la consommation d'eau à l'intérieur	6	-	-
Consommation d'eau des tours de refroidissement	2	-	-
Comptage de l'eau	1	-	-

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - Énergie et atmosphère

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
PRÉREQUIS			
Mise en service et vérification fondamentales	-	I	GP, FI
Performance énergétique minimale	-	I	FI
Mesure de l'énergie à l'échelle du bâtiment	-	-	-
Gestion fondamentale des frigorigènes	-	-	-
CRÉDITS OPTIONNELS			
Mise en service améliorée	6		
<i>Opt. 1. Mise en service améliorée des systèmes</i>	4	I	GP, PR
<i>Opt. 2. Mise en service de l'enveloppe</i>	2	I	GP, FI
Optimiser la performance énergétique	18		
<i>Opt. 1. Simulation énergétique de l'ensemble du bâtiment</i>	18	-	-
<i>Opt. 2. Méthode prescriptive : Advanced Energy Design Guide de l'ASHRAE</i>	5	I	FT, FI, FC
Mesure de l'énergie avancée	1	-	-
Intervention en fonction de la demande	2	-	-
Production d'énergie renouvelable	3	-	-
Gestion améliorée des frigorigènes	1	-	-
Électricité verte et compensations en fixation de carbone	2	-	-

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - Matériaux et ressources

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
PRÉREQUIS			
Collecte et entreposage des matériaux recyclables	-	-	-
Planification de la gestion des déchets de construction et de démolition	-	D	GP, PC, PF
Réduction des sources de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques – Mercure	N/A	N/A	N/A
CRÉDITS OPTIONNELS			
Réduction des impacts du cycle de vie du bâtiment	5		
<i>Opt. 1. Réutilisation de bâtiments historiques</i>	5	D	R
<i>Opt. 2. Rénovation de bâtiments abandonnés ou sordides</i>	5	D	R
<i>Opt. 3. Réutilisation des bâtiments et des matériaux</i>	4	D	R
<i>Opt. 4. Évaluation du cycle de vie de l'ensemble du bâtiment</i>	3	D	LCA
Divulgence et optimisation des produits des bâtiments – Déclarations de produits environnementaux	2		
<i>Opt. 1. Déclaration environnementale de produits (DEP)</i>	1	D	PP, ACV, CDE
<i>Opt. 2. Optimisation multiattributs</i>	1	D	PP, PT, ACV, CDE
Divulgence et optimisation des produits des bâtiments – Approvisionnement en matières premières	2		
<i>Opt. 1. Déclaration relative à la source et à l'extraction des matières premières</i>	1	D	PE, PP, CDE
<i>Opt. 2. Pratiques d'extraction de la direction</i>	1	D	PE, PP, PT, CDE
Divulgence et optimisation des produits des bâtiments – Ingrédients des matériaux	2		
<i>Opt. 1. Déclaration des ingrédients des matériaux</i>	1	D	PE, PP, CDE
<i>Opt. 2. Optimisation des ingrédients des matériaux</i>	1	D	PE, PP, PT, CDE
<i>Opt. 3. Optimisation de la chaîne d'approvisionnement du fabricant de produit</i>	1	D	PE, PP, PT, CDE
Réduction des sources de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques – Mercure	N/A	N/A	N/A

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - *Matériaux et ressources (suite)*

Réduction des sources de substances persistantes, bioaccumulables et toxiques – Plomb, cadmium et cuivre	N/A	N/A	N/A
Mobilier et mobilier médical	N/A	N/A	N/A
Conception visant l'adaptabilité	N/A	N/A	N/A
Gestion des déchets de construction et de démolition	2	D	PF

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - *Qualité des environnements intérieurs*

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/*	Type**
PRÉREQUIS			
Performance minimale en matière de qualité de l'air intérieur	-	-	-
Contrôle de la fumée de tabac ambiante	-	-	-
Performance acoustique minimale	N/A	N/A	N/A
CRÉDITS OPTIONNELS			
Stratégies d'amélioration de la qualité de l'air intérieur	2	I	COV
Matériaux à faibles émissions	3	I	PC, PR, GP
Plan de gestion de la qualité de l'air intérieur pendant la construction	1	-	-
Évaluation de la qualité de l'air intérieur	2	-	-
Confort thermique	1	I	FC
Éclairage intérieur	2	I	FC
Lumière naturelle	3	-	-
Vues de qualité	1	-	-
Performance acoustique	1	I	FC

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - *Innovation*

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/*	Type**
CRÉDITS OPTIONNELS			
Innovation	5	-	-
Professionnel agréé LEED	1	-	-

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

Catégorie - *Priorité régionale*

	Pointage maximal	Influence sur les matériaux	
		D/I/-*	Type**
CRÉDITS OPTIONNELS			
Priorité régionale	4	-	-

*D : Influence directe, I : Influence indirecte, - : Aucune influence

**Se référer au tableau A.2

ANNEXE B – Informations supplémentaires sur les données de l’inventaire du bâtiment

B.1. Plans, devis et autres documents fournis par le partenaire industriel

Les plans, les devis et les autres documents fournis par le partenaire industriel ne sont pas inclus dans ce document par souci de confidentialité.

B.2. Données tirées d’*Impact Estimator for Buildings* d’Athena

L’inventaire des matériaux constituant le scénario de base a été réalisé principalement à l’aide des documents fournis par le partenaire industriel. Toutefois, les scénarios alternatifs relatifs au changement de la structure principale en béton armé du scénario de base par un autre type de structure n’avaient pas été modélisés par le partenaire industriel. Le logiciel *Impact Estimator for Buildings* d’Athena a donc été utilisé pour estimer les quantités nécessaires de matériaux relatives aux nouveaux types de structure considérés. Afin de s’assurer de la validité des quantités calculées par le logiciel d’Athena, la structure du scénario de base y a été modélisée. Les quantités des matériaux nécessaires pour l’ensemble de la structure en béton armé du scénario de base qui ont été calculées à partir des plans fournis par le partenaire industriel et les quantités estimées par le logiciel sont présentées au tableau B.1.

Tableau B.1. Comparaison de la quantité de matériaux nécessaires pour la structure du scénario de base estimée à partir des plans fournis par le partenaire industriel et à partir du logiciel d’Athena

	Selon les plans du bâtiment	Selon le logiciel d’Athena
Béton	2965 m ³	3251 m ³
Armatures	329 tonnes	356 tonnes

Comme il est possible de le constater au tableau B.1, les quantités estimées à partir des plans sont similaires aux quantités estimées par le logiciel d’Athena. C’est donc pour cette raison que ce logiciel a été utilisé afin d’estimer la quantité de matériaux nécessaires pour les scénarios alternatifs S5 et S6 (section 3.4.2 et figure C.1 de l’annexe C).

ANNEXE C – LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment Through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix. (Supplementary information)

C.1. Data listing of the Base case (S0) and the assessed scenarios

Table C.1.1. presents the bill of materials for each building scenarios, considering all material replacements (Repl.) during the refurbishment stage, plus the generated waste from the construction activities. The generated waste is estimated by using the construction waste factors (CWF) suggested by Athena software [77].

Tableau C.1.1. Amount of materials used for the base case scenario (S0) and the assessed scenarios (S1 to S6)

			AMOUNT OF MATERIALS (kg)						MULTIPLIER			
Material groups	Materials		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Repl.	CWF	
Interior finishing	Ceiling	Fiber tiles	1.20E+05	1.20E+05	1.20E+05	1.20E+05	1.20E+05	1.20E+05	1.20E+05	1	1.10	
		Paint	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4.28E+03	4	1.02
		Steel	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	3.73E+04	1	1.01
	Floor	Concrete finishes	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	1.79E+04	9	1.02
	Interior wall	Doors	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	1.44E+04	2	1.00
		Glass	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	5.80E+04	2	1.00
		Gypsum	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	1.05E+05	2	1.10
		Paint	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	6.20E+03	4	1.02
		Steel	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	6.70E+04	2	1.02
		Various	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	7.53E+03	2	1.10
Envelope	Exterior wall	Aluminium	1.45E+04	4.09E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.45E+04	1.45E+04	1	1.01
		Doors	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2.19E+03	2	1.00
		Fibercement	5.45E+04	0.00E+00	1.21E+05	1.61E+05	0.00E+00	5.45E+04	5.45E+04	5.45E+04	1	1.10
		Insulation	4.48E+04	5.54E+04	5.54E+04	5.54E+04	8.85E+03	4.48E+04	4.48E+04	4.48E+04	1	1.05
		Plastic membrane	3.71E+04	4.60E+04	4.60E+04	4.60E+04	7.34E+03	3.71E+04	3.71E+04	3.71E+04	1	1.00
		Steel	8.14E+04	1.19E+05	7.77E+04	1.02E+05	1.75E+04	8.14E+04	8.14E+04	8.14E+04	1	1.02
	Glazing	1.36E+05	6.77E+04	6.77E+04	6.77E+04	3.69E+05	1.36E+05	1.36E+05	1.36E+05	2	1.00	
	Roof	Bitumen product	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	3.02E+04	2	1.00
		Insulation	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	5.08E+04	2	1.05
		Membranes	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	8.26E+04	2	1.03
Various		1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	1.17E+04	2	1.01	
Foundation	Excavation / Backfilling	Aggregates	3.56E+06	3.56E+06	3.56E+06	3.56E+06	3.56E+06	3.56E+06	3.56E+06	0	1.00	
	Piles	Steel	2.15E+03	2.15E+03	2.15E+03	2.15E+03	2.15E+03	2.15E+03	2.15E+03	0	1.01	
	Reinforced concrete	Concrete	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	1.56E+06	0	1.05
		Reinforcing steel	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	1.29E+04	0	1.01
	Various	Insulation	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	6.49E+03	0	1.05
		Plastic membrane	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	6.92E+02	0	1.02
Various	Various	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	6.94E+03	0	1.10	
Structure	Primary	Concrete	7.47E+06	7.47E+06	7.47E+06	7.47E+06	7.47E+06	0.00E+00	1.92E+06	0	1.05	
		Reinforcing steel	1.36E+05	1.36E+05	1.36E+05	1.36E+05	1.36E+05	0.00E+00	7.53E+03	0	1.01	
		Steel	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.15E+03	3.85E+05	0	1.02
		Wood	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.46E+05	0.00E+00	0	1.01
	Secondary	Steel	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	3.61E+03	0	1.01

Table C.1.2. presents the considered distances to transport materials from manufacture site to the building site (corresponding to the construction and refurbishment stages), and from the building site to waste management site (corresponding to the end of life stage).

Tableau C.2.2. Material transportations used for the base case scenario (S0) and all scenarios (S1 to S6)

Material groups	Materials	TRANSPORTATION (tkm)								DISTANCE (km)		
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Manufacture	EOl		
Interior finishing	Ceiling	Fiber tiles	1.26E+05	1.26E+05	1000	50						
		Paint	4.49E+03	4.49E+03	1000	50						
		Steel	3.92E+04	3.92E+04	1000	50						
	Floor	Concrete finishes	1.88E+04	1.88E+04	1000	50						
	Interior wall	Doors	1.51E+04	1.51E+04	1000	50						
		Glass	6.09E+04	6.09E+04	1000	50						
		Gypsum	1.10E+05	1.10E+05	1000	50						
		Paint	6.51E+03	6.51E+03	1000	50						
		Steel	7.03E+04	7.03E+04	1000	50						
		Various	7.91E+03	7.91E+03	1000	50						
Envelope	Exterior wall	Aluminium	1.53E+04	4.29E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.53E+04	1.53E+04	1000	50
		Doors	2.30E+03	2.30E+03	1000	50						
		Fibercement	5.72E+04	0.00E+00	1.27E+05	1.69E+05	0.00E+00	5.72E+04	5.72E+04	5.72E+04	1000	50
		Insulation	4.70E+04	5.82E+04	5.82E+04	5.82E+04	9.29E+03	4.70E+04	4.70E+04	4.70E+04	1000	50
		Plastic membrane	3.90E+04	4.83E+04	4.83E+04	4.83E+04	7.71E+03	3.90E+04	3.90E+04	3.90E+04	1000	50
		Steel	8.54E+04	1.25E+05	8.16E+04	1.07E+05	1.84E+04	8.54E+04	8.54E+04	8.54E+04	1000	50
	Roof	Glazing	1.43E+05	7.11E+04	7.11E+04	7.11E+04	3.88E+05	1.43E+05	1.43E+05	1.43E+05	1000	50
		Bitumen product	3.17E+04	3.17E+04	1000	50						
		Insulation	5.33E+04	5.33E+04	1000	50						
		Membranes	8.67E+04	8.67E+04	1000	50						
Foundation	Excavation / Backfilling	Aggregates	1.78E+05	50	0							
		Steel	2.26E+03	2.26E+03	1000	50						
	Reinforced concrete	Concrete	1.56E+05	1.56E+05	50	50						
		Reinforcing steel	1.35E+04	1.35E+04	1000	50						
	Various	Insulation	6.81E+03	6.81E+03	1000	50						
Plastic membrane		7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	7.26E+02	1000	50	
Structure	Primary	Various	7.28E+03	7.28E+03	1000	50						
		Concrete	7.47E+05	7.47E+05	7.47E+05	7.47E+05	7.47E+05	0.00E+00	1.92E+05	50	50	
		Reinforcing steel	1.43E+05	1.43E+05	1.43E+05	1.43E+05	1.43E+05	0.00E+00	7.90E+03	1000	50	
		Steel	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.26E+03	4.04E+05	1000	50
	Secondary	Wood	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.79E+05	0.00E+00	1000	50
		Steel	Steel	3.79E+03	3.79E+03	3.79E+03	3.79E+03	3.79E+03	3.79E+03	3.79E+03	1000	50

C.2. Amount estimation for S5 and S6

Tableau C.2. Comparison between the amount of base case structure materials calculated from the plans and specifications and estimated by the Athena's software

	Plans and specifications	Athena's software
Concrete	2965 m ³	3251 m ³
Reinforced steel	329 tonnes	356 tonnes

C.3. MR credit in LEED v4

Materials and Resources (MR) LEED category contains two (2) prerequisites and five (5) optional credits, for a total of 13 points. All these prerequisites and optional credits can be classified into three main areas:

- Waste management:
 - (Prerequisite) Storage and collection of recyclables
 - (Prerequisite) Construction and demolition waste management planning
 - (Credit – 2 points) Construction and demolition waste management
- Life cycle impact reduction:
 - (Credit – 5 points) Building life cycle impact reduction
- Building product disclosure and optimization (BPDO):
 - (Credit – 2 points) BPDO – Environmental product declarations
 - (Credit – 2 points) BPDO – Sourcing of raw materials
 - (Credit – 2 points) BPDO – Material ingredients

Within MR category, it should be noted that LCA is included: 1) in Option 4. Whole-building life cycle assessment, in Building life cycle impact reduction optional credit, worth three points, and 2) in BPDO – Environmental product declarations optional credit, worth two points. In this study, the critical evaluation of LEED v4 only concern the requirements of the Option 4 in Building life cycle impact reduction optional credit.

To meet Option 4 requirements in Building life cycle impact reduction optional credit, the LCA results of the building must be compared to a baseline building. Both buildings must be of comparable size, function, orientation, operating energy performance and service life. Only the environmental impacts associated with the structure, foundation, and envelope on the whole building life cycle were considered. Additional building elements, such as interior non-structural materials and finishes, can be included under the project team discretion. However, use stage energy consumption, electrical and mechanical equipment, plumbing, alarm systems, elevators, conveying systems, and parking lots (except parking structures) are excluded from the analysis. The same LCA software and datasets, which are compliant with ISO 14044, must be used. To achieve the three points granted to this Option 4, the environmental impacts of the compared building

must decrease by more than 10 % in at least three of six specified impact categories listed in the right column of tableau 3.2 in the article, and no impact categories must increase by more than 5 %. Those three points cannot be partially achieved.

C.4. Detailed LCA results of the base case scenario

These nine materials contribute between 48 % to 80 % of the building material LCA impacts.

Tableau C.4. Five highest contributors to each midpoint category of IMPACT 2002+ method, excluding the environmental impact from use stage energy consumption

Material ¹		IMPACT CATEGORIES (IMPACT 2002+) ²														
		GW	OZO	RESP-O	T-ACI/EUT	A-ACI	A-EUT	ENER	A-ECO	CARC	N-CARC	RESP-I	RAD	T-ECO	OCC	MIN
IN	Interior wall / Steel			4%		6%	16%	4%	10%	10%	8%	7%		12%		17%
	Interior wall / Doors															12%
	Interior wall / Paint															12%
EN	Exterior wall / Steel	5%	5%	5%	6%	7%	20%	5%	12%	12%	10%	9%	6%	15%		21%
	Exterior wall / Windows / Glazing	5%	5%		7%	8%	2%	6%	6%	4%		6%	7%	4%		2%
	Exterior wall / Plastic membrane			7%							4%					
FO	Reinforced concrete / Concrete	7%	4%		5%								5%			4%
ST	Primary structural system / Concrete	32%	21%	9%	25%	18%	6%	20%	13%	6%	13%	20%	24%	17%	19%	2%
	Primary structural system / Reinforcing steel	18%	16%	23%	18%	18%	32%	19%	24%	32%	24%	25%	16%	22%	10%	37%
TOTAL		66%	51%	48%	61%	57%	75%	53%	64%	64%	59%	66%	57%	69%	57%	80%

¹ Interior finishing (IN), Envelope (EN), Foundation (FO), and Structure (ST).

² IMPACT 2002+ midpoint categories : Global warming (GW), Ozone layer depletion (OZO) , Respiratory organics (RESP-O), Terrestrial acidification and nitrification (T-ACI/EUT), Aquatic acidification (A-ACI), Aquatic eutrophication (A-EUT), Non-renewable energy (ENER), Carcinogens (CARC), Non-carcinogens (N-CARC), Respiratory inorganics (RESP-I) , Ionizing radiation (RAD), Aquatic ecotoxicity (A-ECO), Terrestrial ecotoxicity (T-ECO), Land occupation (OCC) and Mineral extraction (MIN).

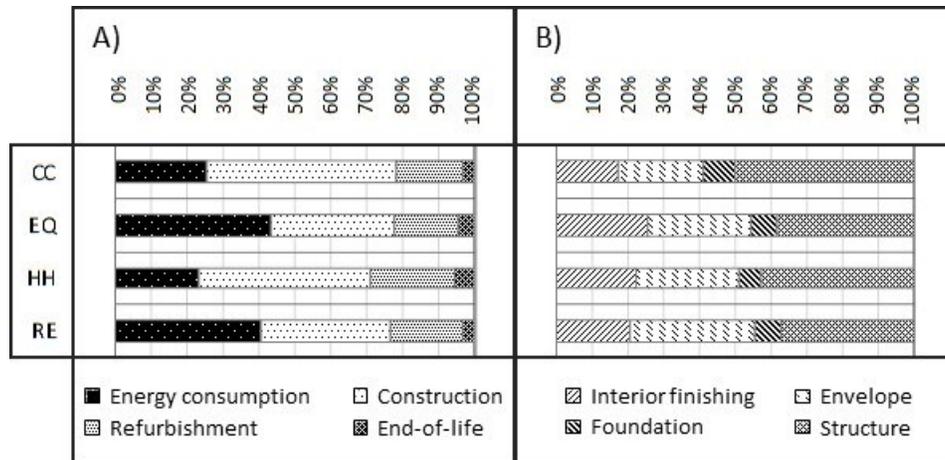


Figure C.4. Contribution analysis of the office building life cycle environmental impacts using the IMPACT 2002+ method. Part (A) refers to the contributions of the base case scenario life cycle stages and part (B) refers to the contributions of materials excluding the use stage. Endpoint categories are: Climate change (CC), Ecosystem quality (EQ), Human health (HH) and Resources (RE)

C.5. Detailed evaluation of the assessed scenarios

The figure C.5 is divided into three parts, the first two parts (figure C.5 (part A) and figure C.5 (part B)) provide supporting information for the main figure C.5 (part C). Figure C.5 (part C) summarizes the variations in two parts: 1) Building environmental impact variations on IMPACT 2002+ impact categories, and 2) Life cycle stage contributions for each impact variation, as detailed in figure C.5 (part A). The shaded/filled portion of the strip represents other material impacts and the unshaded/unfilled portion represents transport impacts.

With the bar chart part in figure C.5, it is possible to dig deeper to check where the impact variations come from when some materials are changed. In the majority of cases, the impacts associated with the material manufacturing cause the main variations for both construction and refurbishment stages. In the first four scenarios (envelope components), the variations are caused mainly by the different material types and the total amount of material needed for the construction and refurbishment stages. The replacements consider the material life time in reference to the building life time. Furthermore, changing structure components have no effects on the refurbishment stage as it is not repaired or replaced during the whole building life cycle. Consequently, the variations occur during construction and end of life stages. Mainly, the end of life stage variations are caused by

the lower material weight involved in both structure scenarios (S5 and S6), in contrast with the base case scenario, of which environmental impacts are related to material transportation from the building site to the waste disposal facility. However, in general, transportation contributes very little to these variations.

C.6. Sensitivity analysis (Base case and scenarios)

C.6.1. Impact assessment method: TRACI 2.1

C.6.1.1. LCA results of the base case scenario

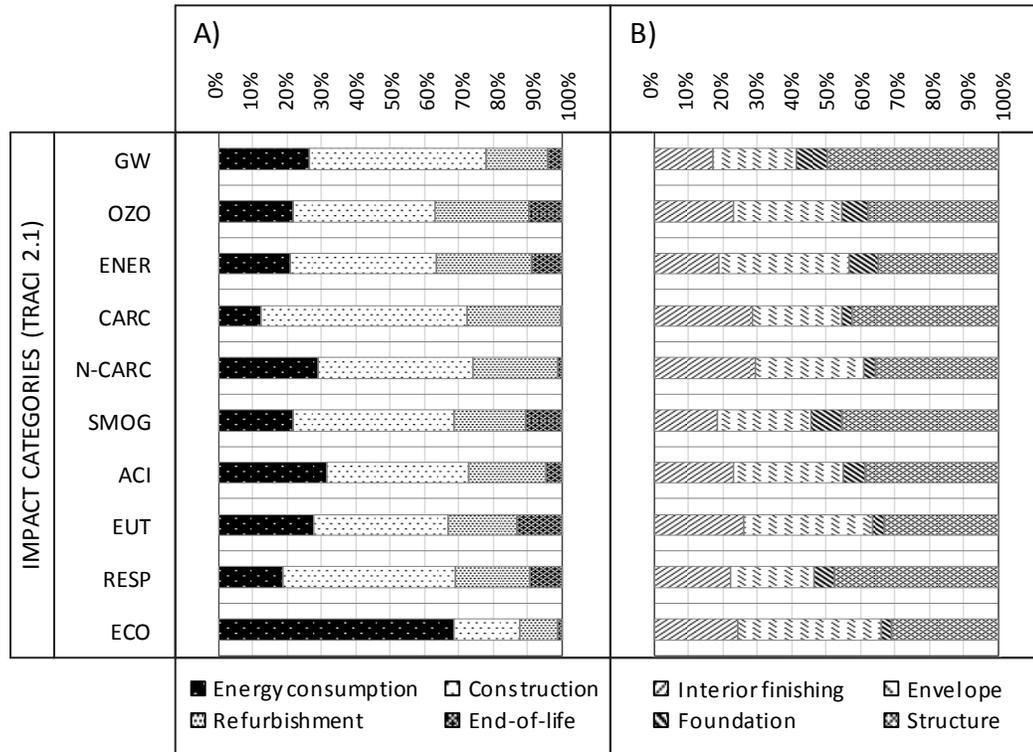


Figure C.6.1.1. Contribution analysis of the office building life cycle environmental impacts using the TRACI method. Part (A) refers to the contributions of the base case scenario life cycle stages and part (B) refers to the contributions of materials excluding the use stage. Categories are: Midpoint categories are: Global warming (GW), Acidification (ACI), Eutrophication (EUT), Carcinogenics(CARC), Non carcinogenics (N-CARC), Respiratory effects (RESP), Ecotoxicity (ECO), and Fossil fuel depletion (ENER).

C.6.1.2. Results of the assessed scenarios

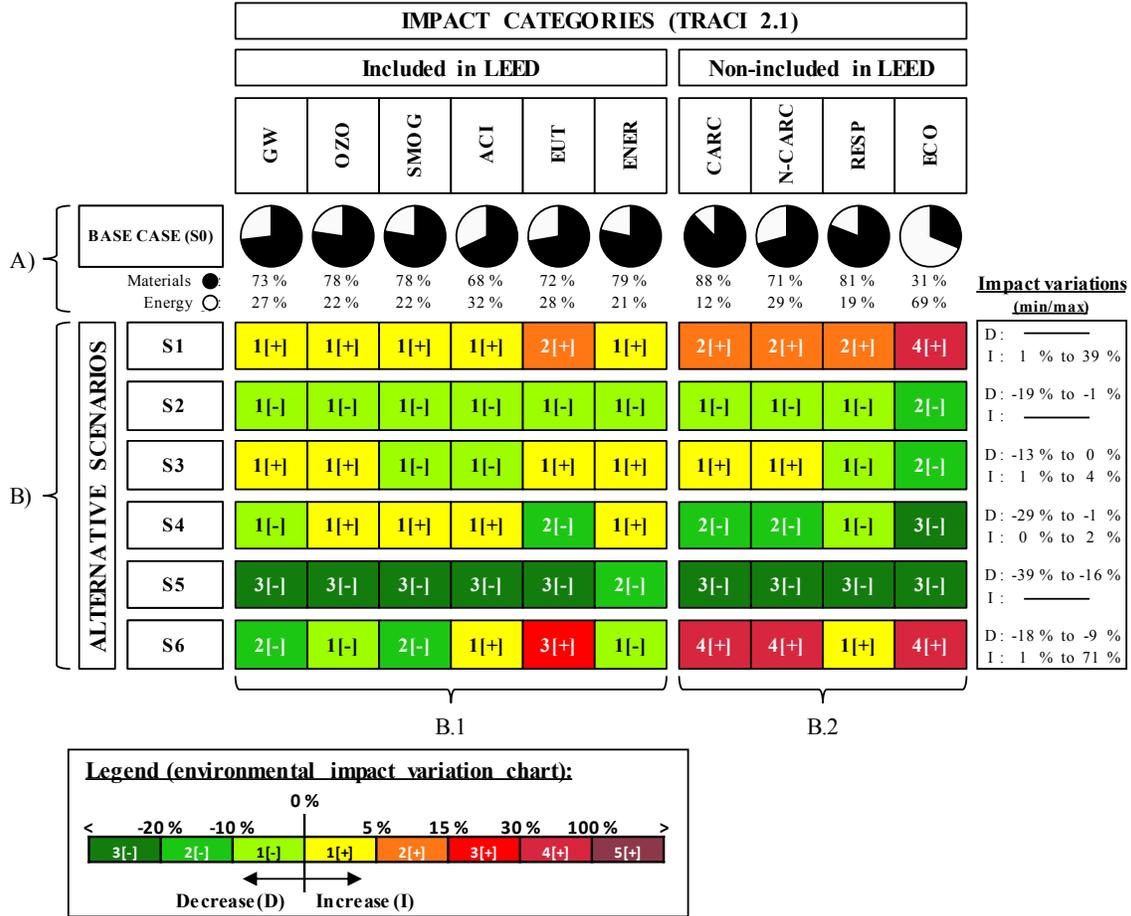


Figure C.6.1.2. Material effects on office building LCA impacts using the TRACI 2.1 categories. A) The S0 row displays the contributions of energy consumption (in white) and materials (in black) in the building LCA impacts. B) Variations due to material changes from the base case scenario for the six scenarios. TRACI 2.1 impact categories are divided into two parts: included (B.1) and not included (B.2) in LEED v4. The thresholds to obtain “Option 4. Building life cycle impact reduction” optional credit are defined by the first four quotations in the legend, an increase (< 5%) is identified by the “1[+]” quotation and the minimum decrease (< -10%), by the “2[-]” quotation.

C.6.2 Use stage energy consumption changed by $\pm 20\%$

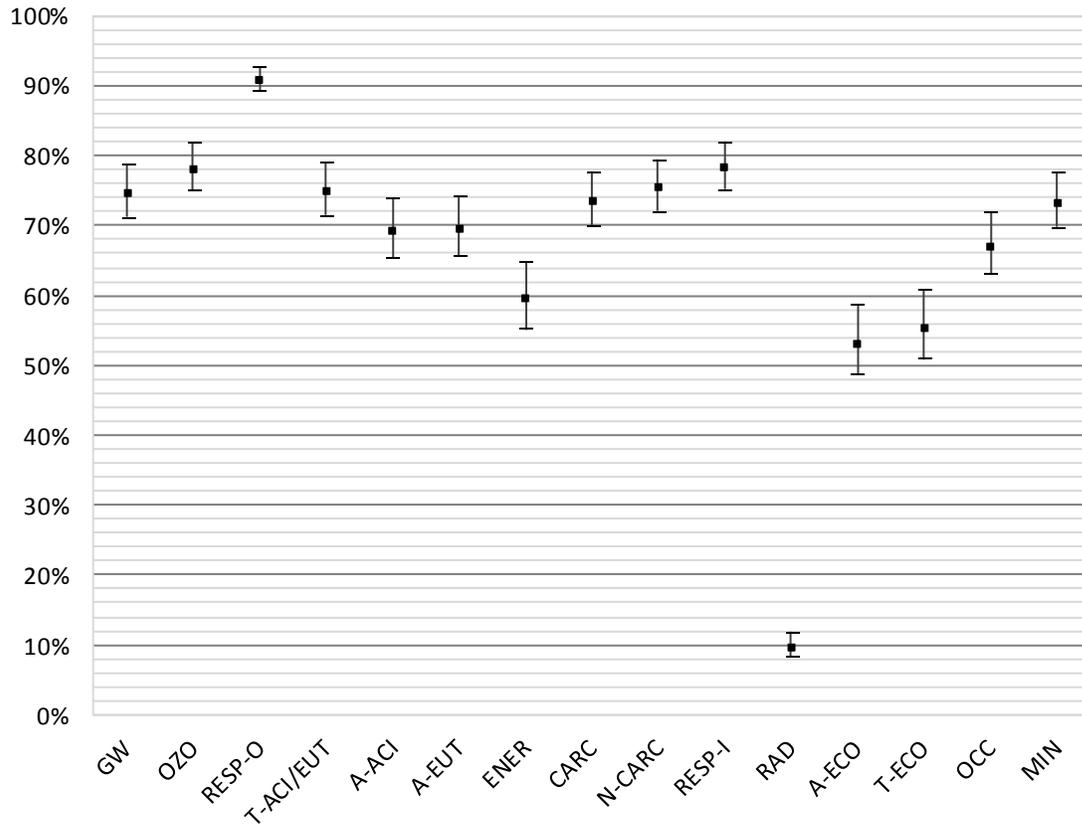


Figure C.6.2. Material contribution on base case scenario (S0) life cycle environmental impacts evaluated using the IMPACT 2002+ midpoint categories. For each impact category, the middle point represents the material environmental impact contribution to building life cycle in function of the amount of energy consumption considered for the study. The bottom and the top bars from the middle point represent a decrease and an increase of 20 %, respectively, from the energy consumption considered for the study.

Tableau C.6.2 Building environmental impact variations (in %) for all alternative scenarios as a function of the base case scenario (S0), using the IMPACT 2002+ midpoint categories. Three different amounts of use stage energy consumption are compared: 80 % (0.8), 100 % (1.0), and 120 % (1.2) of the energy consumption considered in the modelling of the base case scenario (i.e. 121.5 kWh/(m²-year)).

	S0			S1			S2			S3			S4			S5			S6		
	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2
GW	-5	0	5	-4	1	6	-6	-1	4	-4	1	6	-6	-1	4	-34	-29	-23	-19	-14	-9
OZO	-4	0	4	-3	1	5	-6	-1	3	-4	1	5	-5	0	4	-21	-17	-12	-11	-7	-2
RESP-O	-2	0	2	2	4	6	-1	1	3	2	3	5	-11	-10	-8	-21	-19	-17	-6	-4	-2
T-ACI/EUT	-5	0	5	-3	2	7	-8	-3	2	-5	0	5	-4	1	6	-22	-17	-12	-11	-6	-1
A-ACI	-6	0	6	-4	3	9	-9	-3	3	-7	-1	5	-6	1	7	-22	-16	-10	-5	1	7
A-EUT	-6	0	6	1	7	13	-7	-1	5	-3	3	9	-16	-10	-4	-27	-21	-15	34	40	46
ENER	-8	0	8	-7	1	10	-9	-1	7	-8	0	8	-9	-1	7	-21	-13	-5	-13	-5	3
CARC	-5	0	5	0	5	10	-7	-2	3	-4	1	6	-11	-6	0	-28	-23	-18	9	14	19
N-CARC	-5	0	5	0	5	10	-6	-1	4	-3	2	6	-12	-7	-2	-22	-17	-12	6	11	16
RESP-I	-4	0	4	0	4	9	-7	-3	1	-5	-1	4	-7	-2	2	-25	-21	-16	-3	1	5
RAD	-18	0	18	-18	0	18	-18	0	18	-18	0	18	-18	0	18	-19	-1	17	-19	-1	17
A-ECO	-9	0	9	-7	2	12	-11	-2	8	-9	1	10	-11	-1	8	-11	-1	8	2	11	21
T-ECO	-9	0	9	-5	4	13	-10	-1	8	-7	2	11	-14	-5	4	-11	-2	7	9	18	27
OCC	-7	0	7	-6	0	7	-7	0	7	-5	1	8	-8	-1	5	400	406	413	-12	-5	1
MIN	-5	0	5	3	8	14	-8	-2	3	-3	2	8	-16	-11	-6	-32	-27	-22	41	46	51

ANNEXE D – Analyses complémentaires relatives à l’ACV

D.1. Évaluation des scénarios alternatifs en fonction des catégories de dommage d’IMPACT 2002+

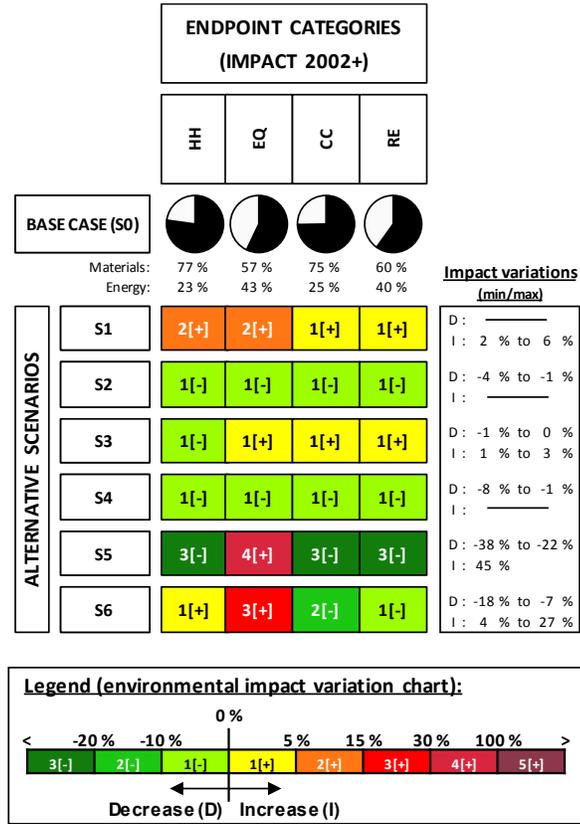


Figure D.1. Effets des matériaux sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment évalués selon les catégories de dommage d’IMPACT 2002+. La ligne du S0 représente les contributions de la consommation énergétique (en blanc) et des matériaux (en noir) sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment. Les variations de ces impacts occasionnées par le changement de matériaux du scénario de base, représenté par les scénarios alternatifs, sont représentées par les lignes suivantes et n’incluent pas les impacts de la consommation énergétique (voir section 3.4.2). La cote représentant ces variations réfère à la légende au bas de la figure. Les catégories de dommage d’IMPACT 2002+ ne sont pas incluses dans LEED v4. Les limites considérées dans les critères de l’Option 4 du crédit optionnel Réduction des impacts du cycle de vie du bâtiment sont définies par les quatre premières cotes de la légende, dont la limite maximale d’augmentation de ces impacts (< 5 %) est définie par la cote « 1[+] » et la limite de réduction minimale de ces impacts (< -10 %), par la cote « 2[-] ».

D.2. Analyses de sensibilité de la durée de vie du bâtiment et des matériaux

Dans la littérature, la durée de vie de conception d'un bâtiment à bureaux peut se situer généralement entre 50 et 100 ans. Pour le bâtiment à l'étude, la durée de vie est posée à 50 ans, durée pour laquelle il a été conçu. De plus, il est supposé que la consommation énergétique, et par conséquent les impacts environnementaux lui étant associés, est proportionnelle à la durée de vie du bâtiment et est constante sur l'ensemble de cycle de vie de celui-ci. Autrement dit, si la durée de vie est doublée, la consommation énergétique totale sur le cycle de vie du bâtiment est aussi doublée. Toutefois, contrairement à la consommation énergétique, les impacts environnementaux associés aux matériaux ne suivent pas ce principe. Étant donné que les matériaux constituant le bâtiment ont une durée de vie qui leur est propre (figure C.1 de l'annexe C), la relation entre la durée de vie du bâtiment et les impacts environnementaux associés aux matériaux n'est pas linéaire. C'est donc pour cette raison qu'une analyse de sensibilité a été effectuée afin d'évaluer l'influence de cette relation sur les conclusions de l'étude. Pour ce faire, une durée de vie de 100 ans, plutôt que 50 ans, a été considérée (tableau D.2.1). Il est à noter que cette analyse a été réalisée en posant l'hypothèse que la conception du bâtiment considérant une durée de vie de 100 ans reste la même que celle d'une durée de vie de 50 ans. De plus, les matériaux n'ayant pas été considérés comme étant remplacés durant la phase de rénovation du bâtiment à l'étude, comme les éléments de structure, sont aussi considérés comme tels pour la durée de vie de 100 ans. Cela veut donc dire que les impacts environnementaux associés aux 50 ans supplémentaires ne sont occasionnés seulement que par le remplacement supplémentaire des matériaux considérés lors de la phase rénovation ainsi que par la consommation énergétique supplémentaire. Ainsi, la contribution des phases du cycle de vie du bâtiment aux impacts environnementaux selon une durée de vie de 50 ans, comme il a été présenté à la section 3.4.1, et selon une durée de vie de 100 ans est présentée au tableau D.2.1.

Tableau D.2.1. Comparaison de la contribution des phases du cycle de vie aux impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment, selon les catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+, entre deux durées de vie différentes, soit 50 ans (en gras) et 100 ans.

Catégories d'impacts	Consommation énergétique	Matériaux			Contribution totale des matériaux
		Construction	Rénovation	Fin de vie	
GW	25%	53%	18%	4%	75%
	34%	35%	29%	3%	66%
OZO	22%	41%	28%	9%	78%
	28%	26%	40%	6%	72%
RESP-O	9%	52%	35%	4%	91%
	12%	33%	52%	3%	88%
T-ACI/EUT	25%	45%	22%	8%	75%
	32%	29%	33%	6%	68%
A-ACI	31%	40%	22%	8%	69%
	38%	25%	31%	6%	62%
A-EUT	30%	45%	23%	1%	70%
	37%	27%	35%	1%	63%
ENER	40%	35%	20%	5%	60%
	48%	21%	27%	3%	52%
CARC	26%	48%	25%	1%	74%
	33%	29%	37%	1%	67%
N-CARC	24%	47%	27%	2%	76%
	31%	30%	39%	1%	69%
RESP-I	22%	48%	22%	8%	78%
	28%	31%	35%	6%	72%
RAD	90%	6%	3%	1%	10%
	93%	3%	4%	1%	7%
A-ECO	47%	32%	19%	3%	53%
	54%	18%	26%	2%	46%
T-ECO	45%	34%	17%	4%	55%
	53%	20%	24%	3%	47%
OCC	33%	31%	28%	8%	67%
	39%	18%	38%	5%	61%
MIN	26%	49%	24%	0%	74%
	33%	30%	37%	0%	67%

Il est possible de constater à l'aide des résultats présentés au tableau D.2.1 que les matériaux dominent les impacts environnementaux du bâtiment, peu importe la durée de vie considérée. De plus, en sachant que les impacts environnementaux de la consommation énergétique doublent et que ceux de la phase de construction restent identiques, il est possible d'observer

que les impacts environnementaux durant la phase de rénovation équivalent pratiquement aux impacts environnementaux associés aux matériaux des 50 premières années du bâtiment. Il est donc possible d'en conclure que plus la durée de vie du bâtiment est longue, plus la phase de rénovation devrait être davantage prise en considération lors de la conception d'un bâtiment dans l'optique d'optimiser ou de réduire les impacts environnementaux des bâtiments.

Ainsi, la durée de vie du bâtiment considérée dans le cadre de cette étude ne change pas le fondement même des conclusions obtenues. La contribution des matériaux et leur influence sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment restent considérables et montrent une fois de plus la faible cohérence avec la considération des matériaux dans LEED v4. La seule différence qui résulte de cette analyse concerne l'identification des matériaux contribuant majoritairement aux impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment et l'influence de la sélection des matériaux sur ces impacts. Concrètement, selon les résultats présentés au tableau D.2.1, les matériaux nécessitant plusieurs remplacements, qui sont en fonction de leur durée de vie respective, devraient pouvoir influencer davantage les impacts environnementaux d'un bâtiment ayant une durée de vie plus longue. Ceci modifierait en quelque sorte les conclusions présentées à la section 3.5.2, en augmentant le potentiel de variation des impacts environnementaux des matériaux associés à l'enveloppe et en diminuant celui des matériaux de la structure.

D.3. Contrôle de cohérence

Le contrôle de cohérence vérifie la cohérence entre la définition des objectifs et du système et les hypothèses, les méthodes et les données utilisées [14]. Une des méthodes utilisées afin de vérifier la cohérence des résultats dans cette étude est de calculer le rapport entre la quantité de CO₂ fossile équivalente émise, en gramme de CO₂ équivalent (g CO₂ éq.), et l'énergie primaire non renouvelable utilisée, en MJ. La relation entre ces deux valeurs est principalement due au fait que la majorité des émissions générées par les activités anthropiques proviennent principalement de la combustion d'énergies fossiles [17]. Cette relation, tel qu'illustrée à la figure D.3, se situe normalement entre 0 et 100 g CO₂ éq. / MJ. Ainsi, en analysant chaque phase du cycle de vie de cette façon, il est possible de valider sommairement la cohérence des résultats obtenus.

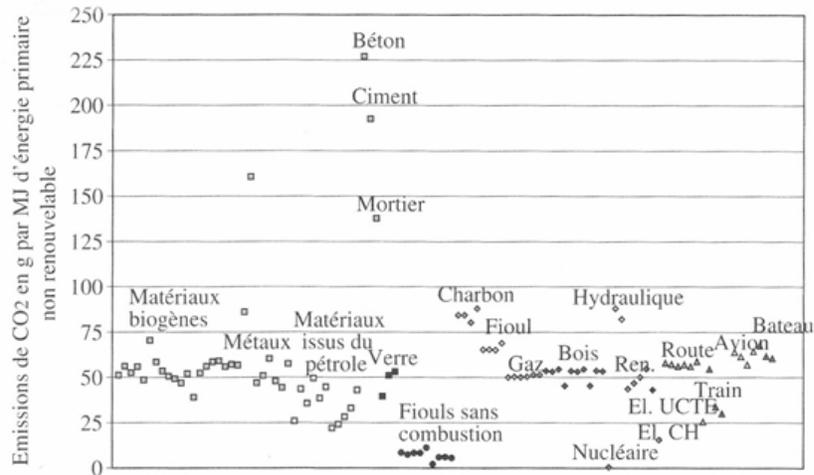


Figure D.3. Rapport entre les émissions de CO₂ fossile équivalente et la consommation d'énergie primaire non renouvelable pour différents matériaux, vecteurs systèmes énergétiques et moyens de transport (Jolliet et al. (2010) [17])

Pour cette étude, les quantités de CO₂ fossile équivalente et d'énergie primaire non renouvelable consommée sont évaluées respectivement, à l'aide du logiciel SimaPro 8.2, par les méthodes d'analyse de l'impact IPCC 100a et Cumulative Energy Demand 1.09. Les résultats obtenus pour chacune des phases du cycle de vie du bâtiment sont présentés au tableau D.3.

Tableau D.3. Rapport entre les émissions de CO₂ fossile équivalente et la consommation d'énergie primaire non renouvelable pour chacune des phases du cycle de vie du scénario de base

Phases du cycle de vie	Émissions de CO ₂ (en g)	Énergie non renouvelable (en MJ)	Rapport
Consommation énergétique	1,6E+09	3,4E+07	47
Construction	3,0E+09	2,9E+07	103
Rénovation	1,1E+09	1,6E+07	65
Fin de vie	2,4E+08	4,2E+06	56

Le rapport entre les émissions de CO₂ fossile équivalent et la consommation d'énergie primaire non renouvelable de chacune des phases du cycle de vie du scénario de base (tableau D.2.1), à l'exception de la phase de construction, satisfait la relation vers laquelle devrait tendre les résultats (figure D.3), soit se situer entre 0 et 100 g CO₂ éq. / MJ. L'exception à cette règle de la phase de construction peut être expliquée par l'utilisation d'une grande quantité de béton lors de cette phase. En se référant à la figure D.3, il est possible de constater que la relation entre les émissions de CO₂ fossile équivalente et la consommation

d'énergie primaire non renouvelable pour le béton est beaucoup plus élevée, soit à environ 225 g CO₂ éq. / MJ. Ainsi, il est donc normal que ledit rapport de la phase de construction soit un peu plus élevé. Par conséquent, en fonction de l'ensemble de ces résultats, la modélisation semble cohérente pour l'ensemble des phases du cycle de vie du bâtiment.

D.4. Analyse de la qualité des données d'inventaires

L'analyse de la qualité des données d'inventaires est réalisée selon la méthode utilisée par la Chaire internationale sur le cycle de vie dans un de ses rapports techniques, intitulé « Analyse du cycle de vie de tasses réutilisables et de gobelets à café à usage unique » [87]. Même si cette méthode n'utilise qu'une analyse simplifiée de la qualité, elle permet d'obtenir une bonne vue d'ensemble du type de données d'inventaire utilisées. Selon cette méthode, l'analyse de la qualité des données est évaluée de façon qualitative par des critères de qualification des données utilisées concernant leur fiabilité (quantité) et leur représentativité (processus). Ces critères sont présentés au tableau D.4.1.

Tableau D.4.1 Critères de qualification concernant la fiabilité et la représentativité des données (modifié de Chaire internationale sur le cycle de vie (2014) [87])

Critères de qualification des données			
Note	Fiabilité (quantités)	Représentativité (processus)	Généralité
1	Données vérifiées mesurées ou calculées sur le terrain. Cette donnée remplit le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude.	Données de terrain (du cadre à l'étude), de laboratoire. Cette donnée remplit le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude.	Remplit le critère pour le cas à l'étude.
2	Données vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou données non vérifiées issues de mesures (documents fournis par le mandataire ou littérature). Cette donnée est jugée suffisamment précise/fiable pour le cas à l'étude.	Bonne représentativité géographique et/ou technologique du processus sélectionné. Cette donnée est jugée suffisamment représentative pour le cas à l'étude.	Jugée suffisamment représentative pour le cas à l'étude.
3	Données non vérifiées, en partie issues d'hypothèses ou d'estimation. Cette donnée est jugée utilisable, mais sa fiabilité/précision pourrait être améliorée.	Données relatives au même procédé ou matériau, mais se référant à une technologie différente. Cette donnée est jugée utilisable, mais sa représentativité pourrait être améliorée.	Jugée utilisable, mais pouvant être améliorée.
4	Données estimées de façon grossière. Cette donnée ne remplit pas le critère « fiabilité/précision » requis pour le cas à l'étude.	Représentativité géographique et/ou technologique inadéquate. La donnée recherchée n'est pas facilement accessible, utilisation d'un autre processus comme approximation. Cette donnée ne remplit pas le critère « représentativité » requis pour le cas à l'étude.	Ne remplit pas le critère pour le cas à l'étude et est considérée comme étant limitée ou insuffisante.

Afin de mettre en perspective l'analyse de la qualité des données, la contribution de chacun des processus aux impacts environnementaux totaux du cycle de vie du bâtiment est réalisée parallèlement. L'analyse de la qualité des données réalisée de façon conjointe à l'analyse de contribution permet de déterminer l'importance de la qualité d'une donnée en fonction de son importance à la contribution aux impacts environnementaux évalués. Afin de simplifier cette comparaison, seules les catégories de dommage de la méthode d'EICV IMPACT 2002+ sont considérées pour l'analyse de contribution (c.-à-d. santé humaine, qualité des écosystèmes, changement climatique et ressources). La contribution maximale, tous indicateurs confondus, est représentée par la charte de couleur présentée au tableau D.4.2.

Tableau D.4.2 Critères de contribution

Contribution	Critères de contribution
0-5 %	Contribution potentiellement faible ou négligeable 6-10%
6-15 %	Contribution potentiellement influente
16-50 %	Forte contribution potentielle
51-100 %	Très forte contribution potentielle

Ainsi, l'analyse de contribution, dont la plage de valeurs de chaque processus correspond à la contribution minimale et à la contribution maximale des catégories de dommage considérées, et de l'analyse de la qualité sont présentées au tableau D.4.3. Seuls les principaux processus sont présentés dans ce tableau.

Tableau D.4.3 Contribution des processus et qualité des données d'inventaire

			CONTRIBUTION AUX IMPACTS TOTAUX						QUALIFICATION			
			S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Fiabilité	Représentativité	
Matériaux												
Phase construction (sans transport)												
Aménagement intérieur	Plafond	Acier	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	3	3	
		Peinture	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Carreaux de fibres	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-3%	0-2%	3	3	
	Plancher	Finition à béton	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Gypse	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
	Cloisons intérieures	Acier	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-3%	0-2%	3	3	
		Verre	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Portes	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Divers	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Peinture	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
Enveloppe	Murs extérieurs	Aluminium	0-1%	1-3%	0-0%	0-0%	0-0%	0-2%	0-1%	2	3	
		Acier	1-4%	2-5%	1-4%	1-5%	0-1%	1-5%	1-4%	3	3	
		Portes	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	2	3	
		Fibrociment	0-1%	0-0%	0-2%	0-2%	0-0%	0-1%	0-1%	2	3	
		Isolation	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Membrane plastique	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Fenêtres/Vitrage	0-2%	0-1%	0-1%	0-1%	1-4%	0-2%	0-2%	2	3	
	Toiture	Membranes	0-2%	0-1%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	2	3	
		Divers	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Isolant	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	2	2	
		Produit bitumineux	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Remblai/Déblai	Granulats	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Pieux	Acier	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	2	3
Fondation	Béton armé	Béton	0-5%	0-5%	0-5%	0-5%	0-5%	0-6%	0-5%	2	2	
		Armature	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	2	2	
	Divers	Divers	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
		Isolation	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	2	2	
		Membrane plastique	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	2	3	
Structure	Principale	Acier	0-0%	0-0%	0-0%	0-0%	0-0%	0-1%	14-30%	3	2	
		Béton	4-21%	4-21%	4-21%	4-21%	4-21%	0-0%	0-6%	2	2	
		Armature	9-18%	8-18%	9-19%	9-18%	9-19%	0-0%	0-1%	3	2	
		Bois	0-0%	0-0%	0-0%	0-0%	0-0%	7-34%	0-0%	3	2	
	Secondaire	Acier	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	2	

Tableau D.4.3 Contribution des processus et qualité des données d'inventaire (suite)

			CONTRIBUTION AUX IMPACTS TOTAUX							QUALIFICATION	
			S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Fiabilité	Représentativité
Matériaux (suite)											
Phase réparation (sans transport)											
Aménagement intérieur	Plafond	Acier	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	3	3
		Peinture	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Carreaux de fibres	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-3%	0-2%	3	3
	Plancher	Finition à béton	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	3	3
		Cloisons intérieures	Gypse	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3
	Acier		1-4%	1-4%	1-4%	1-4%	1-4%	1-5%	1-4%	3	3
	Verre		0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-2%	0-1%	3	3
	Portes		0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
	Divers		0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
	Peinture	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3	
Enveloppe	Murs extérieurs	Aluminium	0-1%	1-3%	0-0%	0-0%	0-0%	0-2%	0-1%	2	3
		Acier	1-4%	2-5%	1-4%	1-5%	0-1%	1-5%	1-4%	3	3
		Portes	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Fibrociment	0-1%	0-0%	0-2%	0-2%	0-0%	0-1%	0-1%	2	3
		Isolation	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Membrane plastique	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Fenêtres/Vitrage	0-3%	0-2%	0-2%	0-2%	2-7%	0-4%	0-3%	2	3
	Toiture	Membranes	0-3%	0-2%	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	2	3
		Divers	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	0-1%	3	3
		Isolant	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	0-3%	2	2
	Produit bitumineux	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	0-2%	3	3	
Phase fin de vie (sans transport)			1-6%	1-6%	1-6%	1-6%	1-6%	0-4%	0-3%	3	3
Transport			6-17%	5-17%	6-18%	6-18%	6-18%	6-12%	4-12%	3	3
Consommation énergétique			22-43%	21-42%	23-44%	22-43%	23-46%	28-47%	22-42%	2	2

ANNEXE E – Pistes d'éléments clés de LEED v4

Certains paramètres intégrés dans les critères de LEED v4 ont été identifiés comme éléments clés pouvant potentiellement influencer de façon considérable les impacts environnementaux des bâtiments, soit le transport des matériaux ainsi que la gestion des déchets de construction.

E.1. Transport des matériaux

Le transport des matériaux n'est pas attribué à un crédit optionnel en soi dans LEED v4. Toutefois, sa considération peut permettre de bonifier les matériaux respectant les exigences de trois crédits optionnels de la catégorie *Matériaux et ressources* de LEED v4. En effet, une majoration du double de la valeur considérée pour atteindre les critères respectifs de chacun de ces crédits peut être accordée aux matériaux provenant (c'est-à-dire extraits, fabriqués, entreposés et vendus) d'un rayon maximal de 160 kilomètres du site de construction du bâtiment. Étant donné que ce critère peut avoir une influence significative sur l'obtention de ces crédits, ce critère a été évalué en modifiant certaines données de la modélisation du scénario de base.

Les impacts associés au transport des matériaux sont directement proportionnels à leurs poids, à leurs distances parcourues et au type de transport utilisé. Cette analyse porte seulement sur les deux premiers éléments, soit le poids et la distance parcourue. Le type de transport n'est pas analysé, car, dans le cas présent, le même type de transport est considéré pour l'ensemble des matériaux. Alors, représenter cette contribution en matière d'impacts environnementaux n'apporte pas d'informations supplémentaires.

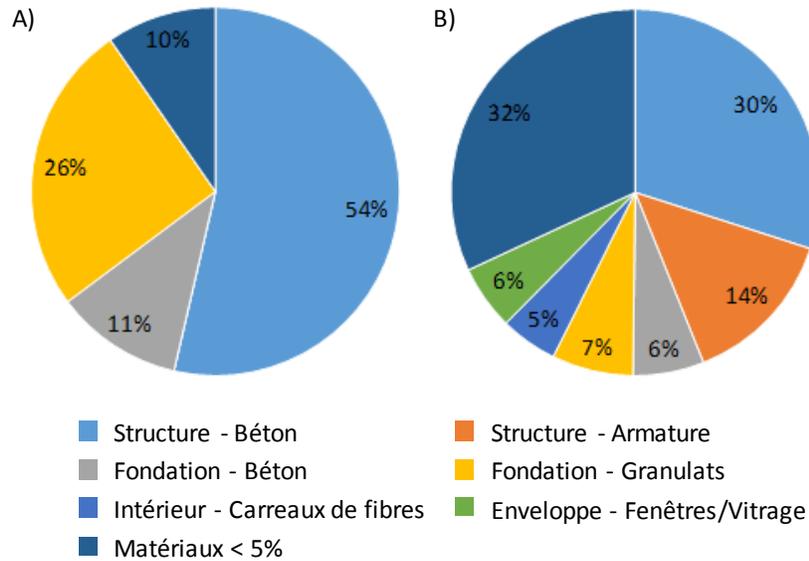


Figure E.1. Contribution des matériaux composant le scénario de base selon A) leur poids respectif et B) leur poids transporté

La contribution des principaux matériaux composant le scénario de base en fonction de leur poids respectif et leur poids transportés, c'est-à-dire leur poids multiplié par leur distance parcourue, est illustrée à la figure E.1. Cette figure montre que le transport du béton est le principal contributeur au poids du bâtiment et au poids transporté des matériaux, et par conséquent aux impacts environnementaux occasionnés par le transport. Ainsi, le béton est sélectionné afin d'évaluer l'effet du transport sur les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment. Les variations des impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment occasionnées par l'augmentation de la distance de transport du béton considérée pour l'étude, qui est de 50 km, à la distance limite pour avoir droit à la bonification pour certains crédits optionnels de LEED v4, qui est de 160 km, sont présentées au tableau E.1. Ces variations sont présentées de deux façons au tableau E.1, soit en excluant (colonne de gauche) et en incluant (colonne de droite) les impacts environnementaux de la consommation énergétique durant la phase d'exploitation du bâtiment.

Tableau E.1. Variation des impacts environnementaux, selon les catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+, due à l'augmentation de la distance de transport, de 50 à 160 km, entre le site de production du béton et la localisation du bâtiment pour la livraison du béton lors de la construction du bâtiment en excluant et en incluant les impacts associés à la consommation énergétique durant la phase d'exploitation (CE).

	Catégories d'impacts	Variation excluant CE	Variation incluant CE
Inclus dans LEED	GW	4%	3%
	OZO	8%	6%
	RESP-O	2%	2%
	T-ACI/EUT	5%	4%
	A-ACI	3%	2%
	A-EUT	1%	1%
	ENER	5%	3%
Exclus de LEED	CARC	1%	1%
	N-CARC	3%	3%
	RESP-I	4%	3%
	RAD	6%	1%
	A-ECO	6%	3%
	T-ECO	13%	7%
	OCC	6%	4%
	MIN	0%	0%

Comme il peut être constaté par les résultats présentés au tableau E.1, l'influence du transport sur les impacts environnementaux du bâtiment est relativement faible. Ce constat a aussi été reporté par quelques autres études [4,7]. De plus, cette influence semble bien moindre que celle due à la sélection des matériaux, dont les résultats sont présentés à la section 3.5.2. Il devient donc important de se questionner sur l'intérêt, d'un point de vue environnemental, de bonifier les matériaux provenant d'un rayon de 160 km de la localisation du bâtiment lorsque privilégier certains matériaux pouvant provenir de l'extérieur de cette limite pourrait permettre d'avoir des bénéfices environnementaux beaucoup plus importants sur le cycle de vie du bâtiment. Un exemple concret de ce questionnement est l'utilisation du bois pour la structure principale du bâtiment (S5) comparativement à l'utilisation du béton armé (S0) (section 3.5.2). En effet, malgré une distance de transport beaucoup plus élevée pour les éléments en bois (1000 km) comparativement à celle considérée pour le béton (50 km), l'utilisation du bois comparativement au béton dans le cas de ce projet permet majoritairement de réduire de façon significative les impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment (tableau E.2).

Tableau E.2. Comparaison de la variation des impacts environnementaux, selon les catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+, de S5 en fonction de S0 en distinguant le transport des phases de production et de construction

	Catégories d'impacts	Variation (Production / Construction)	Variation (Transport)
Inclus dans LEED	GW	-26%	-1%
	OZO	-11%	-2%
	RESP-O	-17%	-1%
	T-ACI/EUT	-14%	-2%
	A-ACI	-14%	-1%
	A-EUT	-21%	0%
	ENER	-10%	-1%
Exclus de LEED	CARC	-22%	0%
	N-CARC	-16%	-1%
	RESP-I	-16%	-1%
	RAD	-1%	0%
	A-ECO	0%	-1%
	T-ECO	2%	-3%
	OCC	412%	-2%
	MIN	-27%	0%

Comme le montrent les résultats présentés au tableau E.2, les impacts environnementaux du transport des éléments en bois sont même moins importants que ceux du béton, car ces impacts ne sont pas seulement évalués en termes de distance de transport (ex. kilomètres (km)), mais plutôt en termes de poids transporté (ex. tonnes-km). De plus, ce transport considère non seulement le transport du site de production à la localisation du bâtiment, mais aussi le transport de ces matériaux lors de la fin de vie du bâtiment, soit 50 km supplémentaires dans le cas des deux scénarios. Ainsi, ce sont 678720 tonnes-km d'éléments en bois qui sont transportées pour le S5 comparativement à 1095835 tonnes-km de béton et d'armature pour le S0, dont 747270 tonnes-km ne sont occasionnées que par le béton. Ces données sont présentées au tableau E.3 de façon désagrégée.

Tableau E.3. Comparaison du poids transporté des matériaux du S0 et du S5 en faisant la distinction de la distance parcourue pour transporter les matériaux vers la localisation du bâtiment lors de sa construction et de la distance parcourue pour les transporter lors de la fin de vie du bâtiment

		Béton armé (S0)			Éléments en bois (S5)		
		Construction	Fin de vie	Total	Construction	Fin de vie	Total
Poids (tonnes)	Béton	7473		7805	646		646
	Armature	332					
Distance (km)	Béton	50	50	100	1000	50	1050
	Armature	1050	50	1050			
Poids transporté (tonnes-km)	Béton	373635	373635	747270	646400	32320	678720
	Armature	331967	16598	348565			
	Total	705602	390233	1095835			

Bien que la prise en compte du poids transporté permet de mieux cerner les impacts environnementaux associés au transport des matériaux, seulement la distance de transport est considérée dans LEED v4. Ainsi, en supposant que le béton du S0 et le bois du S5 répondent aux autres exigences des crédits optionnels auxquels sont associés les critères relatifs au transport, seulement le béton pourrait obtenir la bonification bien qu'il soit plus dommage que le bois en termes de poids transporté.

En résumé, deux éléments importants pour la définition des critères relatifs à la provenance des matériaux peuvent être tirés de cette analyse : 1) le poids transporté devrait être l'unité cible plutôt que la distance en soi et 2) la provenance des matériaux devrait bonifier seulement les configurations de matériaux occasionnant de plus faibles impacts environnementaux que la moyenne des autres configurations de matériaux de fonctions similaires.

E.2. Gestion des déchets de construction

Les déchets de construction (CW, de l'anglais *Construction Waste*) se définissent comme étant les surplus de matériaux nécessaires durant la construction du bâtiment qui ne sont pas utilisés pour des raisons directement ou indirectement liées à des aspects techniques ou logistiques. Les CW peuvent être de la même nature qu'à leur arrivée au chantier de construction ou dénaturés par un mélange avec d'autres substances ou matériaux. Ainsi, il est possible d'attribuer à ces CW non seulement les impacts environnementaux associés à leurs gestions en fin de vie, mais aussi à leur production, étant donné qu'ils n'ont pas été utilisés pour la durée de vie utile pour laquelle ils ont été créés, ainsi qu'à l'ensemble de leurs transports. En fonction de cette considération, il est possible d'évaluer l'effet de la limitation de la quantité

de CW exigée par le crédit optionnel *Gestion des déchets de construction et de démolition* de la catégorie *Matériaux et ressources* de la certification LEED v4 (annexe A). L'Option 2. *Réduction de la quantité totale de déchets* de ce crédit optionnel exige de ne pas générer plus de 12,2 kg de déchets par mètre carré de superficie du bâtiment. Ici, il est supposé que les facteurs permettant de calculer la quantité de CW (CWF, de l'anglais *Construction Waste Factor*), tirés d'*Impact Estimator for Buildings* d'Athena [77], permettent d'estimer de façon acceptable la quantité de déchets qui est générée lors de la construction et de la réparation du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie (section 3.4.1 et figure C.1 de l'annexe C). Ainsi, il a été estimé que le scénario de base génère 46 kg/m² de déchets de construction. Comme il est illustré à la figure E.2, les CW relatifs au béton représenteraient près de 90 % de la génération totale de déchets en terme massique sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, soit près de 42 kg/m². Par exemple, si la totalité des déchets de construction relatifs au béton est évitée, seulement 4 kg/m² de déchets seraient générés, ce qui satisferait amplement la limite de 12,2 kg/m² du crédit optionnel de LEED v4 concerné. Toutefois, les impacts environnementaux dus à ces CW ne sont pas proportionnels à leur contribution massique (figure E.2). Par conséquent, l'application de ce critère peut avoir une influence très variable sur les impacts environnementaux d'un bâtiment en fonction des matériaux ciblés dans l'optique de réduire la génération de déchets de construction.

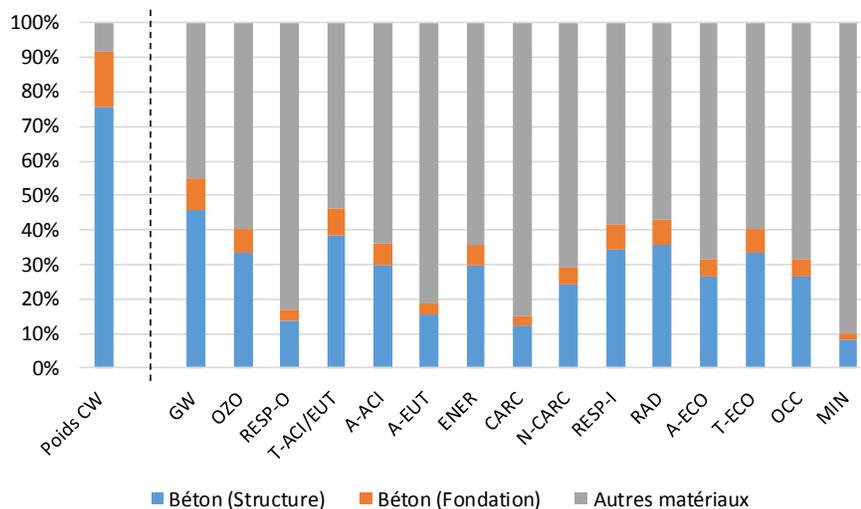


Figure E.2. Comparaison de la contribution au poids des déchets de construction générés tout au long du cycle de vie du bâtiment du béton et des autres matériaux et de leur contribution aux impacts environnementaux, selon les catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+, sur le cycle de vie du bâtiment associée exclusivement aux déchets de construction.

Ceci étant dit, il est à mentionner que les impacts environnementaux des CW sont relativement marginaux comparativement au reste des impacts environnementaux du cycle de vie du bâtiment (tableau E.4). En fait, les CW représentent seulement une contribution moyenne de 2 % au total des impacts environnementaux du bâtiment. Il est à noter, toutefois, que cette contribution est d'un ordre de grandeur comparable à la contribution du crédit optionnel *Gestion des déchets de construction et de démolition* au total du pointage de LEED v4 (2 points sur les 110 disponibles, soit environ 2 %).

Tableau E.4. Contribution des CW aux impacts environnementaux, selon les catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+, du cycle de vie du bâtiment en excluant et en incluant les impacts associés à la consommation énergétique durant la phase d'exploitation (CE) du bâtiment.

	Catégories d'impacts	ACV excluant CE	ACV incluant CE
Inclus dans LEED	GW	3%	2%
	OZO	3%	2%
	RESP-O	3%	2%
	T-ACI/EUT	3%	2%
	A-ACI	3%	2%
	A-EUT	2%	1%
	ENER	3%	2%
Exclus de LEED	CARC	2%	2%
	N-CARC	2%	2%
	RESP-I	3%	2%
	RAD	3%	0%
	A-ECO	2%	1%
	T-ECO	2%	1%
	OCC	3%	2%
	MIN	1%	1%

