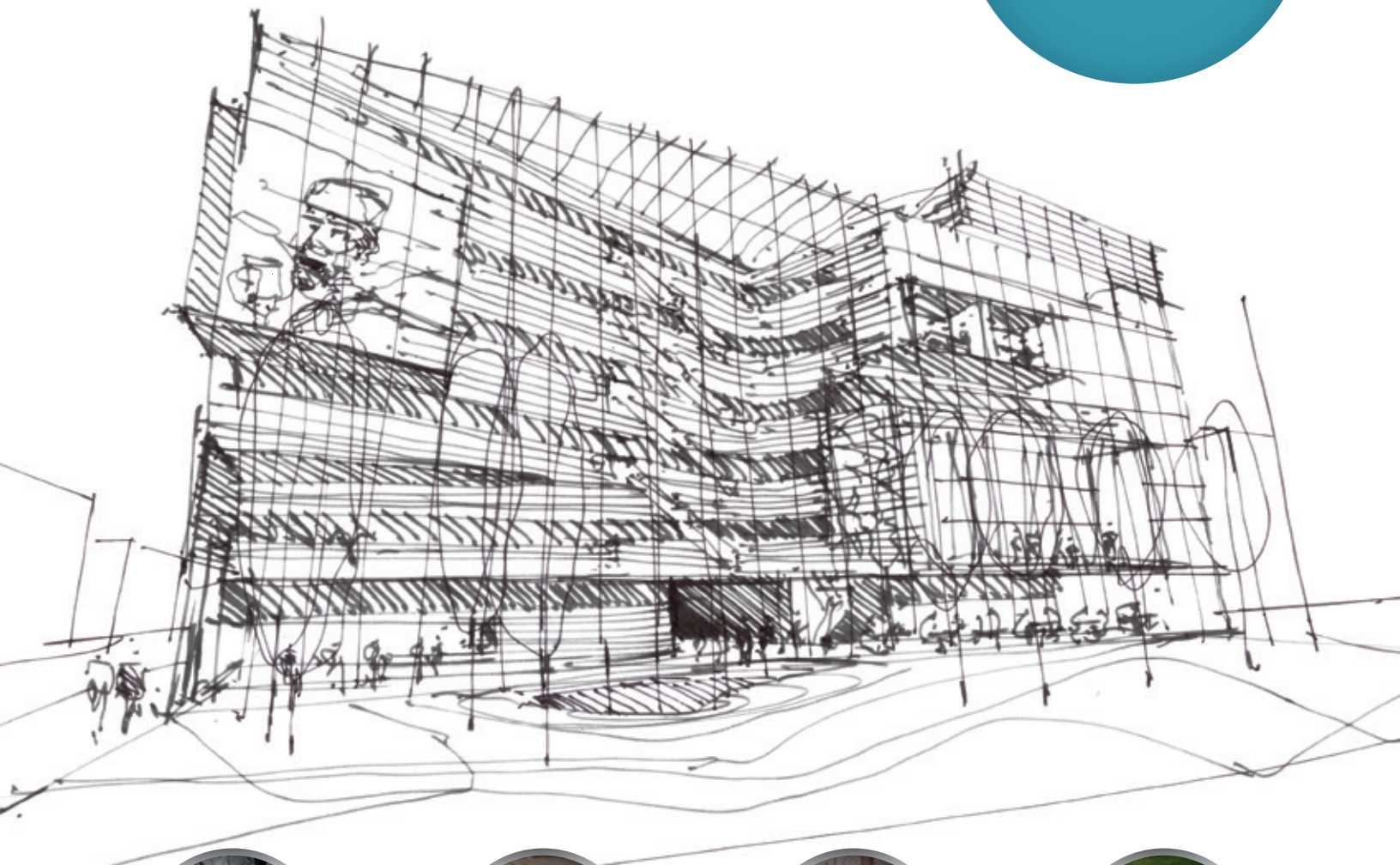


équiterre

Changer le monde, un geste à la fois

L'IMPACT
DES MATÉRIAUX



ANALYSE DU CYCLE DE VIE

de la Maison du développement durable

© 2017 Équiterre

Équiterre tient à remercier la Fondation familiale Trottier et le groupe CRH Canada pour leur contribution financière ayant permis de réaliser ce rapport.

Rédaction et coordination : Normand Roy, chargé de projet bâtiment, Équiterre.

Crédit esquisse page couverture : Menkes Shooner Dagenais Letourneux Architectes.

AUTRES REMERCIEMENTS

Diane Thode (inventaire des matériaux et modélisation), Ricardo Leoto (modélisation), Charles Thibodeau (analyse des données), Julie Tremblay (révision et coordination), Dale Robertson (infographie), Athena Sustainable Materials Institute (conseiller à la modélisation), Simulead (simulation énergétique), Diane Morin (réalisation des graphiques et infographies), Joël Bertrand (vérification des données d'inventaire), Danielle Marcheterre (révision linguistique), Catherine David (conception graphique).

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	6
Les enjeux de la réalisation d'un bâtiment durable	6
L'analyse du cycle de vie : un incontournable	7
L' <i>Impact Estimator</i> : un outil adapté à l'analyse des impacts environnementaux de la MDD	8
MÉTHODOLOGIE	10
Les catégories d'impacts	10
Notre démarche d'analyse	12
Le bâtiment référence	13
La normalisation	15
LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE	16
Les impacts environnementaux totaux de la MDD vs bâtiment référence	17
Les impacts normalisés	17
Les impacts environnementaux par étape du cycle de vie	19
Les émissions de GES attribuables aux matériaux	22
La petite histoire des revêtements extérieurs	24
Des enjeux de gypse	27
Une question de structure : bois vs béton	29
Les stratégies d'économie d'impacts spécifiques aux matériaux	38
Les démarches exploratoires : réutilisation de matériaux	38
Les matériaux évités : recouvrement de colonnes et plafonds suspendus	39
L'évolution de l' <i>Impact Estimator</i>	41
L'analyse de sensibilité	42
La comparaison des résultats avec ceux d'autres études	45
La MDD aurait-elle obtenu le crédit ACV de LEED® V4 ?	46
CONCLUSION	49
RÉFÉRENCES	52

LISTE DES GRAPHIQUES, DES ILLUSTRATIONS ET DES TABLEAUX

GRAPHIQUES

Graphique 1	Impacts totaux. MDD vs Référence	17
Graphique 2	Impacts normalisés agrégés. MDD vs Référence	18
Graphique 3	Impacts de la MDD par étape du cycle de vie	19
Graphique 4	Potentiel de réchauffement climatique de la MDD. Évaluation de différentes hypothèses énergétiques	20
Graphique 5	Contributeurs aux impacts liés à l'énergie de fonctionnement de la MDD. Gaz naturel vs électricité	21
Graphique 6	Impact de différents matériaux de revêtement	27
Graphique 7	Comparaison d'approches structurales. Béton et bois	32
Graphique 8	Impacts évités. Economies d'énergie vs structure en bois	33
Graphique 9	Triple vitrage et géothermie. Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux	35
Graphique 10	Triple vitrage et chauffage au gaz. Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux	36
Graphique 11	Uréthane giclé et géothermie. Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux	36
Graphique 12	Uréthane giclé et chauffage au gaz : Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux	37
Graphique 13	Impacts globaux de la MDD selon différentes versions de l' <i>Impact Estimator</i>	41
Graphique 14	Impacts totaux de la MDD. Durées de vie du bâtiment	43
Graphique 15	Impacts totaux de la MDD. Lieux d'implantation	44
Graphique 16	Impact des matériaux. Étude du Crédit ACV de LEED	46

ILLUSTRATIONS

Illustration 1	Étapes du cycle de vie d'une cloison intérieure typique	8
Illustration 2	Notre démarche	12
Illustration 3	Graphique synthèse	16
Illustration 4	Contribution au réchauffement climatique par famille de matériaux	22
Illustration 5	Photo des pieux	23
Illustration 6	Maquette de la MDD avec panneaux de conteneurs	24
Illustration 7	Preuve de livraison de la brique par train	25
Illustration 8	Impact du lieu de fabrication. Usine Lafarge au Kentucky vs usine CGC de Montréal	28
Illustration 9	Diapositive originale. Résultat de l'ACV structure en béton vs bois	29
Illustration 10	Les bases de bossoirs avant et après leur déménagement	39
Illustration 11	Plafond sans tuiles acoustiques	39

TABLEAUX

Tableau 1	Description du bâtiment référence	14
Tableau 2	Synthèse de l'étude structurale	30
Tableau 3	Contribution spécifique des stratégies réduisant les impacts liés aux matériaux	40
Tableau 4	Recensement des résultats d'études similaires	45

SOMMAIRE

Dans le but d'évaluer l'impact des matériaux de la Maison du développement durable (MDD), un immeuble de bureaux de 68 000 pieds carrés situé à Montréal, au Canada, premier bâtiment à avoir obtenu la certification LEED® Platine Nouvelle construction (NC) au Québec, Équiterre a réalisé une analyse du cycle de vie, en utilisant l'*Impact Estimator* de l'Institut Athena (*Athena Sustainable Materials Institute*). Afin de faciliter l'interprétation des résultats et d'établir une base comparative, un bâtiment référence a également été imaginé et analysé. Les résultats de cette analyse comparative, tant en termes de valeur absolue que de valeurs normalisées, démontrent que les bâtiments écologiques tels que la MDD répondent effectivement à leurs promesses d'améliorations environnementales.



Le présent rapport explore également la relation entre certains enjeux pragmatiques de conception de bâtiments et les impacts environnementaux qui en résultent. Les approches adoptées pour la structure et le revêtement extérieur de la MDD sont ainsi

analysées plus en détail, faisant ressortir dans le cas de la structure l'intérêt d'aller au-delà des impacts des matériaux pour intégrer à l'analyse des notions de coût de renoncement environnemental, un concept apparemment peu connu, mais qui se retrouve au centre de la plupart des problématiques de conception de bâtiments écologiques. L'évaluation des matériaux de revêtement extérieur de la MDD fait quant à elle ressortir l'importance des procédés de fabrication dans la génération de leurs impacts du cycle de vie totaux. De plus, la comparaison des impacts générés par la fabrication, l'installation et la disposition de l'uréthane giclé et d'un troisième verre pour le vitrage, avec leurs effets positifs sur l'efficacité énergétique, a confirmé la pertinence environnementale de ces choix, bien qu'elle ne soit pas favorable pour l'ensemble des catégories d'impacts mesurées.

Si nos travaux ont mis en lumière des liens insoupçonnés entre les motivations environnementales des concepteurs de la MDD et les impacts environnementaux réels découlant de certains de leurs choix, une réalité pouvant dans certains cas s'éloigner radicalement des présomptions habituelles du milieu du bâtiment durable, ils ont également fait ressortir d'importantes limites quant aux résultats générés par l'*Impact Estimator*.



« Comment choisir entre deux approches de conception ayant un pointage LEED® équivalent ? »

INTRODUCTION

Les enjeux de la réalisation d'un bâtiment durable

Qu'est-ce qu'un bâtiment écologique ? C'est la première question que se pose un environnementaliste aspirant à construire un bâtiment écologique. Bien que la certification LEED® ait justement été inventée pour répondre à cette question, elle l'a été essentiellement pour des décideurs immobiliers généralement peu outillés pour réaliser des analyses environnementales approfondies.

Au premier abord, l'équipe d'Équiterre impliquée dans l'ambitieux projet de la Maison du développement durable (MDD) a apprécié les principes et les mécanismes généraux de la certification LEED®, sur la base desquels elle a visé l'obtention de cette certification comme objectif principal de son projet.

Toutefois, au moment d'appliquer concrètement les critères de la grille de certification, d'importantes questions environnementales ont été soulevées. Par

exemple : pour optimiser l'impact environnemental d'un projet, dans quelle section de crédits (énergie, eau, matériaux) est-il préférable d'investir les ressources limitées du projet ? Comment choisir entre deux approches de conception ayant un pointage LEED® équivalent ? Pour les innombrables choix de matériaux, faut-il préférer le contenu recyclé aux matériaux locaux ? Et comment, dans tout ça, prioriser la lutte aux changements climatiques ?

Nous avons ainsi été à même de constater que, pour faire des choix, les expliquer et les assumer, LEED® laisse parfois l'environnementaliste rigoureux sur sa faim.

L'équipe de la MDD a donc évalué des outils pouvant être utilisés pour répondre à ce type de questionnements. Ainsi, le *Sustainable Building Tool* (SBTool) et l'analyse du cycle de vie (ACV) se sont montrés assez prometteurs pour être intégrés aux mandats des professionnels impliqués et utilisés dans les processus décisionnels du projet. Or, malgré des efforts considérables déployés par Équiterre et certains de ses conseillers, l'utilisation de ces outils

s'est révélée être inadaptée à la réalité du projet. La principale raison invoquée par les membres de l'équipe pour justifier leur réticence était un manque de ressources financières, mais il semble également possible de les expliquer par des craintes relatives à l'intégration de procédés innovants, la capacité des équipes étant déjà poussée à sa limite par l'objectif d'atteinte du plus haut niveau de certification LEED®, soit Platine. Au final, l'analyse du cycle de vie n'aura été utilisée qu'à une seule occasion dans le processus de conception de la MDD, un rôle qui sera décrit en détail dans le présent rapport.

Pendant tout le processus de conception et de construction de la MDD, certaines de nos questions concernant l'impact environnemental des matériaux sont demeurées sans réponse. Le présent rapport cherche à répondre à une partie d'entre elles.

Les difficultés inhérentes à l'intégration d'outils d'évaluation environnementale complexes dans un processus décisionnel tout aussi complexe n'ont évidemment pas calmé les questionnements d'Équiterre face aux enjeux environnementaux de ses choix de construction. Un chantier exploratoire a donc été mis en branle dès 2009 avec l'objectif, non pas d'obtenir des données définitives sur la contribution des matériaux à l'impact des bâtiments, mais plutôt de stimuler une discussion sur la question. Par la réalisation du présent rapport, Équiterre souhaite jeter une lumière nouvelle sur la pertinence de diverses stratégies de construction écologique.

L'analyse du cycle de vie : un incontournable

À première vue, l'analyse du cycle de vie (ACV) semblait répondre parfaitement aux préoccupations d'Équiterre en matière de construction écologique. D'un côté, comme son nom l'indique, cette méthodologie intègre dans le calcul des impacts environnementaux l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un matériau, de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de leur vie utile. Cette caractéristique se distingue favorablement des analyses habituellement réalisées pour sélectionner des matériaux, lesquelles se limitent

généralement à l'évaluation de la performance durant leur phase d'utilisation, alors que pour l'ensemble des matériaux ne participant pas à l'efficacité énergétique d'un bâtiment, cette étape ne représente généralement qu'une faible part de leurs impacts totaux.

Les étapes du cycle de vie d'un matériau sont :

- L'acquisition des matières premières
- Le transport et la distribution
- La fabrication
- L'utilisation du produit
- La gestion de la fin de vie (réutilisation, recyclage, valorisation et élimination)

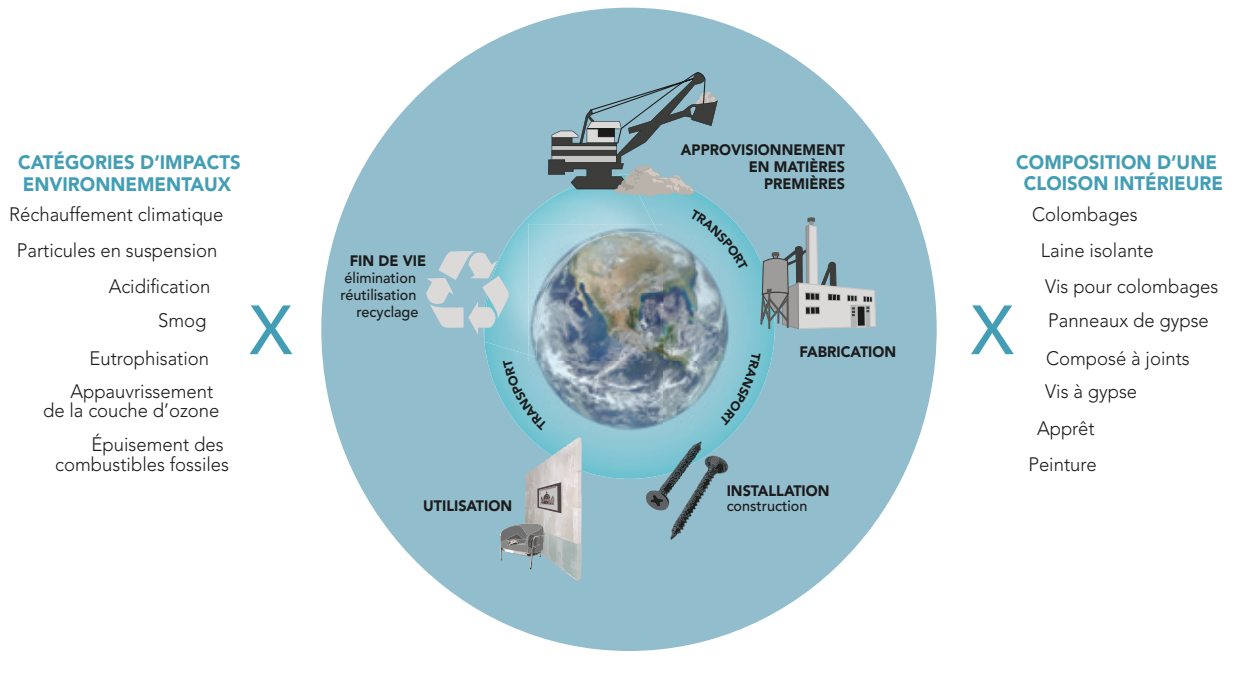
Par ailleurs, un principe fondamental de l'analyse du cycle de vie est la prise en compte de plusieurs catégories d'impacts. Ainsi, l'analyse, et la discussion vont bien au-delà de la simple évaluation des émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est dans cette perspective que l'agence de protection environnementale américaine (*Environmental Protection Agency* (EPA) vise, depuis une quinzaine d'années, à organiser et à normaliser les méthodes de calcul des catégories d'impacts ayant le plus d'incidence sur l'environnement global. Cette initiative a donné naissance à une méthode d'évaluation des impacts nommée TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*) [1], laquelle est utilisée par le logiciel d'ACV *Impact Estimator* [2] choisi pour réaliser la présente étude. Les catégories d'impacts prises en compte par TRACI et utilisées par le logiciel sont :

- Potentiel de réchauffement climatique
- Potentiel de particules en suspension
- Potentiel d'acidification
- Potentiel de smog
- Potentiel d'eutrophisation
- Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone
- Potentiel d'épuisement des combustibles fossiles

Aux étapes du cycle de vie et aux impacts environnementaux, s'ajoute la multitude de matériaux de construction composant un bâtiment. Comme le démontre l'illustration ci-dessous, l'analyse du cycle de vie d'un simple mur intérieur implique à elle seule la réalisation de plusieurs centaines de calculs.

ILLUSTRATION 1

Étapes du cycle de vie d'une cloison intérieure typique



Malgré son intérêt indéniable et sa rigueur scientifique, cette méthode peut s'avérer coûteuse et fastidieuse. Élément de difficulté additionnel, les données nécessaires à ces analyses (l'inventaire du cycle de vie) sont rarement toutes disponibles pour le contexte québécois, ce qui force les analystes à puiser dans des inventaires étrangers en attendant que des données représentant le contexte local soient créées. Malgré des efforts considérables d'élaboration et d'adaptation des données, de nombreuses incertitudes demeurent et compliquent l'interprétation des résultats.

L'analyse du cycle de vie, telle qu'elle est réalisée habituellement sur un produit, s'avère donc un outil mal adapté aux besoins spécifiques des concepteurs de bâtiment. Les récents développements de la modélisation des données du bâtiment (MDB ou BIM) et l'intérêt croissant des manufacturiers pour les déclarations environnementales de produits (DEP)

contribueront à faciliter la réalisation d'une ACV complète de bâtiment.

L'Impact Estimator : un outil adapté à l'analyse des impacts environnementaux de la MDD

Le *Athena Sustainable Materials Institute* a élaboré l'*Impact Estimator* afin de contourner ces difficultés. D'utilisation gratuite et particulièrement simple, ce logiciel permet d'obtenir une estimation comparative des impacts environnementaux de différentes approches structurales et d'enveloppe du bâtiment. Selon l'Institut Athena, ces deux groupes fonctionnels représentent approximativement 80 % des impacts environnementaux des bâtiments.

Afin de faciliter son utilisation lors des phases de conception d'un bâtiment, l'outil fait usage

d'assemblages de matériaux prédéfinis, une approche évitant à l'utilisateur les opérations fastidieuses inhérentes à l'élaboration des inventaires des matériaux envisagés. Ces inventaires constituent une tâche irréconciliable avec les impondérables des phases initiales de conception d'un bâtiment : la vitesse d'exécution et l'évaluation d'approches générales. À titre d'exemple, une fois entrées dans l'*Impact Estimator* une surface de dalle de béton et les portées prévues, le logiciel calcule automatiquement la quantité d'acier d'armature requise. La bibliothèque du logiciel demeure néanmoins assez limitée en termes de matériaux et d'assemblages, un défaut notoire pour les concepteurs tendant vers l'innovation.

L'*Impact Estimator* permet également d'intégrer à l'analyse une estimation de l'énergie d'opération d'un bâtiment, son lieu d'implantation et la durée de vie souhaitée aux fins de l'évaluation ; des variables influençant grandement les impacts environnementaux d'un projet. À elle seule, comme le démontrent la plupart des études de cas réalisées à travers le monde, l'énergie d'opération est responsable de la majorité des impacts environnementaux d'un bâtiment. Dans l'*Impact Estimator*, le lieu d'implantation du projet déterminera la composition du portefeuille énergétique associée à la production de l'électricité pour cette région, laquelle détermine directement les impacts de cette forme d'énergie. À titre d'exemple, l'électricité de la Floride est issue à 68 % du gaz naturel, à 18 % du charbon, à 12 % d'énergie nucléaire et à moins de 2 % d'énergie renouvelable [3]. En revanche, celle du Québec est à 97 % renouvelable, dont 95 % provient de l'hydroélectricité, 0,88 % de l'énergie éolienne et 0,6 % de la biomasse et déchets, en 2012 [4].

Dans le cadre de la présente analyse, notre processus de vérification a fait ressortir un enjeu méthodologique entraînant potentiellement une distorsion significative des résultats générés par l'*Impact Estimator* pour la catégorie d'impacts « réchauffement climatique ». Selon l'Institut Athena, depuis sa version 5.1 l'*Impact Estimator* utilise pour représenter les émissions de GES de tous les types de centrales hydroélectriques nord-américaines un coefficient calculé par Hertwich [5] en 2013 pour désigner la moyenne mondiale des

émissions des centrales hydroélectriques à réservoir. L'Institut Athena justifie ce changement de coefficient par l'intégration au modèle des émissions de méthane engendrées à la suite des inondations nécessaires à l'aménagement des réservoirs. Bien que cette donnée semble valable pour représenter les émissions de GES des centrales à l'échelle mondiale, il est néanmoins contestable de l'utiliser pour représenter celles des centrales hydroélectriques québécoises. En effet, 37 % de la puissance installée d'Hydro-Québec est produite par des centrales au fil de l'eau (sans réservoir) alors que le reste de la production hydroélectrique provient de centrales à réservoir situées dans la région boréale, où la température froide limite la décomposition de la matière organique et donc les émissions de méthane [4] [6]. En 2014, le CIRAIG (Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services) a réalisé, pour le compte d'Hydro-Québec, l'analyse du cycle de vie de la production, de l'achat, du transport et de la distribution de l'électricité au Québec [4]. Cette étude a pris en compte la totalité des sources significatives de GES, dont les émissions de méthane liées aux réservoirs. Soucieux de donner l'image la plus réaliste possible de la situation de la province où est construite la MDD, nous avons inclus dans notre étude des résultats calculés à partir du coefficient d'émissions du CIRAIG, ci-dessous appelé « la méthode CIRAIG ». À titre comparatif, le coefficient d'émissions établi par le CIRAIG est de 0,021 kg éq. CO₂/kWh, soit 8,6 fois plus faible que celui utilisé par l'*Impact Estimator* fixé à 0,179 kg éq. CO₂/kWh.

La « durée de vie » estimée pour le bâtiment, une option qui doit être définie par l'utilisateur de l'*Impact Estimator*, permet quant à elle de déterminer la quantité de cycles de remplacement de certains matériaux pendant la période d'usage du bâtiment. Par exemple, une durée de vie estimée à 50 ans n'impliquera pas de changement de la membrane de toit monolithique en bitume caoutchouté, alors qu'il faudra prévoir au moins un remplacement de toiture si un système goudronné multicouche lui a été préféré, une option nécessitant à la fois plus de matières premières et générant plus de déchets.

MÉTHODOLOGIE

Les catégories d'impacts

TRACI, la méthode normalisée de mesure des impacts environnementaux utilisée par l'*Impact Estimator*, a été développée aux États-Unis à la suite d'un inventaire exhaustif des effets des contaminants environnementaux [7]. Parmi ceux-ci, une sélection a été effectuée sur la base d'une recherche de cohérence avec les réglementations et les politiques en vigueur, la perception de leur importance par les institutions gouvernementales concernées et leur facilité à être modélisées. Les catégories d'impacts choisies sont définies brièvement ci-dessous.



Potentiel d'acidification

Unité : kg éq. SO₂

L'acidification correspond à l'augmentation de la concentration d'ions d'hydrogène (H⁺) dans un milieu. Ceux-ci peuvent provenir d'activités humaines comme la combustion du charbon ou l'utilisation d'automobiles ou de circonstances naturelles. Ce processus peut causer une détérioration des constructions humaines et avoir un impact négatif sur quantité de plantes et d'animaux. Le secteur du bâtiment contribue à l'acidification de l'environnement par la consommation de combustibles fossiles pour la chauffe (ex. : gaz naturel) et lors de la production des matériaux tels que le béton armé, les panneaux de gypse et les tubulures d'acier.



Potentiel d'eutrophisation

Unité : kg éq. N

Phénomène d'enrichissement des écosystèmes aquatiques en nutriments accélérant la productivité biologique, l'eutrophisation peut causer un déséquilibre dans la biodiversité en favorisant certaines espèces au détriment d'autres. L'activité agricole, par un usage excessif de fertilisants, et les rejets d'eaux usées en sont les principales causes. Le secteur du bâtiment participe notamment à l'eutrophisation par la production des matériaux tels que le béton armé et les panneaux de gypse ainsi que par leur transport et leur gestion en fin de vie.



Potentiel de réchauffement climatique

Unité : kg éq. CO₂

Plusieurs phénomènes, dont une majorité directement liée à l'activité humaine, concourent pour provoquer un dérèglement du climat affectant grandement les écosystèmes et les modes de vie humains. D'un côté, les émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation de combustibles fossiles, à l'élevage, à la décomposition des déchets organiques et au relâchement dans l'air de gaz réfrigérants emprisonnent sur terre une partie de plus en plus grande de l'énergie solaire. D'un autre côté, la déforestation et l'acidification des océans limitent la capacité de la planète à absorber le carbone atmosphérique.



Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone

Unité : kg éq. CFC-11

L'ozone stratosphérique protège la surface terrestre des rayons solaires ultraviolets, une forme d'énergie induisant des maladies humaines, nuisant aux plantes et à la vie marine en plus d'accélérer la détérioration de matériaux tels que les plastiques et les fibres naturelles. Certaines substances utilisées comme réfrigérants, solvants, agents d'expansion (mousse de polystyrène) ou retardateurs de flamme, lorsqu'émissionnées dans l'environnement, détériorent la couche d'ozone. La principale source de ces substances liée au secteur du bâtiment est attribuable à l'utilisation des agents d'expansion utilisés pour la fabrication des isolants en mousse plastique (polyuréthane, polystyrène et polyisocyanurate).

**Potentiel de particules en suspension**

Unité : kg éq. PM2.5

Cette catégorie d'impacts rassemble les effets d'une collection diverse de particules émises dans l'air et de composés chimiques se transformant en particules après leur émission dans l'environnement. Les effets de ces particules sur la santé humaine se répartissent sur un continuum passant de simples nuisances respiratoires à des affections pouvant entraîner la mort. La majorité de ces particules sont émises par deux familles de phénomènes : la combustion (bois, combustibles fossiles) et la production de poussières (routes et agriculture). En ce qui concerne le secteur du bâtiment, la production des matériaux tels que le béton armé, les panneaux de gypse et les tubulures d'acier, ainsi que la consommation de gaz naturel ou de mazout pour le chauffage demeurent des sources importantes d'émissions.

**Potentiel de smog**Unité : kg éq. O₃

Pour la méthode TRACI, le smog se définit par la présence d'ozone (O₃) au niveau du sol, lequel s'est créé à la suite de réactions chimiques entre les oxydes d'azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV). Ainsi, la méthode exclut les particules fines. L'ozone ainsi créé peut induire divers problèmes respiratoires chez l'humain, dont certains permanents. Les principaux secteurs responsables de la formation de smog sont ceux des transports et des industries. La production des matériaux, leur transport ainsi que la consommation de combustibles fossiles par les bâtiments contribuent aussi à la création de smog.

**Potentiel d'épuisement des combustibles fossiles**

Unité : MJ

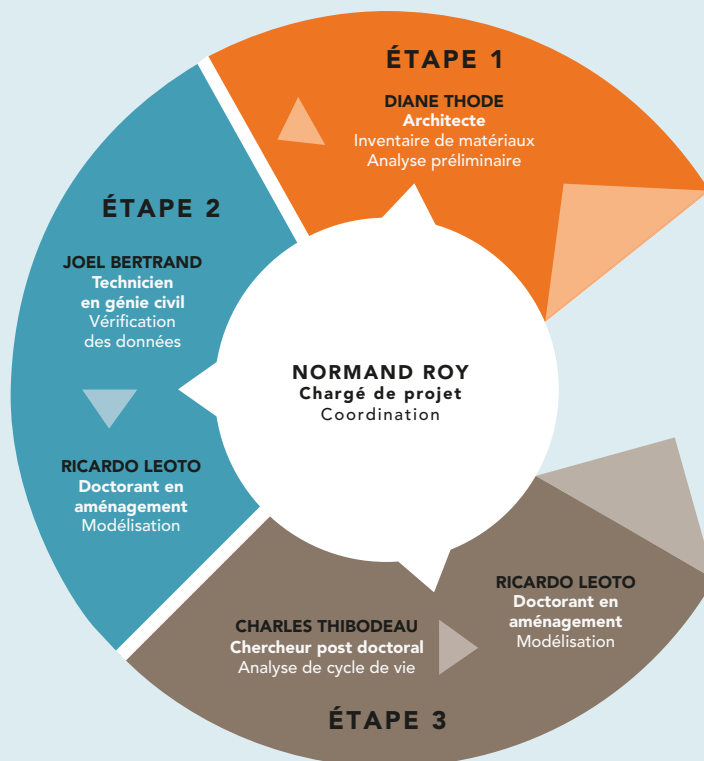
Cet indice vise à pondérer le niveau d'épuisement relatif de différents combustibles fossiles sur la base d'une estimation de leur difficulté d'extraction future. L'horizon temporel envisagé pour établir des scénarios d'extraction de combustibles de remplacement correspond au moment où l'humanité aura consommé cinq fois la quantité totale de ce combustible utilisé à ce jour dans l'histoire. Le concept de « difficulté d'acquisition » est assimilé, pour chaque combustible, à la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire dans le futur pour extraire une unité d'énergie.

Notre démarche d'analyse

L'illustration ci-dessous décrit notre démarche d'analyse de l'impact des matériaux de la MDD, ainsi que le rôle et les qualifications de chacun des intervenants.

ILLUSTRATION 2

Notre démarche



Étape 1 (2010)

Environmental Impact Estimator, version 3

La première modélisation dans *l'Impact Estimator* a été réalisée en 2010 à partir des plans émis pour appels d'offres. Aspirant, malgré les choix limités d'assemblages proposés par le logiciel, à prendre en compte les impacts du plus grand nombre de matériaux possible, nous avons fait un usage abondant de la catégorie « *extra basic materials* », laquelle permet d'ajouter à la modélisation informatique des matériaux exclus des assemblages proposés par le logiciel. C'est ainsi qu'au-delà des options offertes par les interfaces « poutres et colonnes » et « fondations », nous avons évalué les quantités et ajouté au modèle le béton des

pieux, des têtes de pieux, des bassins, des murs de cisaillement et de la passerelle suspendue. De l'acier a également été entré dans la catégorie « *extra basic materials* » pour tenir compte des pieux, des éléments structuraux relatifs au mur rideau et des escaliers. Du polystyrène a aussi été ajouté pour tenir compte de l'utilisation de cette matière comme soufflage à béton.

Avant la conclusion de cette première étape d'analyse, une rencontre de discussion a été organisée avec l'Institut Athena afin de clarifier certaines questions relatives à l'utilisation du logiciel.

Étape 2 (2012)

Impact Estimator for Buildings, version 4

Lors de cette étape, sur la base des plans de la MDD « tel que construit », une vérification systématique des données entrées dans le logiciel lors de l'étape 1 a été effectuée. Un bâtiment de référence basé sur la MDD a alors été constitué, duquel ont été retirés certains éléments écologiques tels que les ajouts cimentaires, l'isolation à l'uréthane giclé, la toiture inversée et le triple vitrage.

Étape 3 (2015/2016)

Impact Estimator, version 5

Cette version de l'*Impact Estimator* permet d'intégrer des matériaux supplémentaires dans chacune des sections fonctionnelles (fondations, murs, toiture, etc.) de l'outil. Cet ajout a permis d'éliminer les « *extra basic materials* » de la modélisation. Certains résultats générés à cette étape ont soulevé des questions qui ont été transmises à l'Institut Athena. Parmi celles-ci, notons celle des émissions de GES attribuées par Athena à la production et au transport de l'électricité canadienne, lesquelles sont très supérieures à celles déclarées par Hydro-Québec. Les résultats disproportionnés du module « D », censé représenter un crédit d'impact généré par le recyclage des matériaux d'un bâtiment en fin de vie, ont aussi fait l'objet d'une révision spécifique, à la conclusion de laquelle il a été jugé préférable de retirer ce module de notre analyse.

Une démarche similaire a mené à l'exclusion de la catégorie d'impacts relatifs à l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, la seule catégorie d'impact pour laquelle la MDD n'était pas plus performante que le bâtiment référence. Dans ce cas, c'est la quantité d'impacts en cause, assez petite pour se situer en deçà de la marge d'erreur du logiciel, qui a justifié le retrait.

Pour conclure cette étape, une ressource externe spécialisée en analyse du cycle de vie s'est jointe à l'équipe pour contribuer à l'évaluation des résultats.

Le bâtiment référence

La quantification des impacts d'un objet ne constitue pas en soi une information particulièrement utile. En effet, savoir par exemple que la fabrication d'une fourchette implique l'émission de 300 grammes de SO₂ équivalent, au-delà d'indiquer ce qui pourrait être économisé en évitant son acquisition, ne nous donne aucune indication sur l'importance relative de ses impacts. La fourchette en elle-même est-elle particulièrement nocive ou pas? Est-il sensé d'éviter l'achat de fourchettes? Si cette question se pose au sujet d'un bien, dont l'utilisation, et donc les impacts peuvent être évités, elle perd tout son sens quand il s'agit d'une structure indispensable comme un bâtiment. Dans ce cas, l'évaluation d'impacts ne peut être que relative, c'est-à-dire structurée comme une comparaison de différentes stratégies constructives (stratégie A vs stratégie B vs stratégie C).

Nous avons ainsi décidé d'évaluer les impacts de la MDD en les comparant à ceux d'un bâtiment référence, lequel est constitué à partir de la modélisation de la MDD modifiée de façon à remplacer certains attributs écologiques par des solutions plus conventionnelles. Le choix des éléments substitués a été déterminé par deux facteurs. En premier lieu, par la capacité de l'*Impact Estimator* d'évaluer les approches concernées, ce qui est le cas pour différentes proportions d'ajouts cimentaires, mais pas, par exemple, pour la proportion de contenu recyclé dans la laine de fibre de verre. Et, en second lieu, par notre perception du potentiel communicationnel des stratégies environnementales de la MDD, basée sur une volonté de traiter d'enjeux pertinents pour l'industrie québécoise du bâtiment.

Le tableau qui suit présente les différences entre le MDD et le bâtiment référence :

TABEAU 1

Description du bâtiment référence

MODÈLE MDD	MODÈLE BÂTIMENT RÉFÉRENCE
Toiture végétalisée	Toiture inversée
25 % ajouts cimentaires*	9 % ajouts cimentaires
Vitrage triple, 2 low e, argon	Vitrage double, 1 low e, argon
Panneaux de fibrociment Fiber C / Briques Shaw (train)	100 % Briques Shaw (train)
Isolant excédentaire par rapport au CMNEB (40-50mm polyisocyanurate)	Aucun isolant excédentaire
Aucun recouvrement de colonnes, tuile acoustique et réutilisation de bossoir usagé	Ajout de tuiles acoustiques, de revêtement de colonnes et bases de bossoirs neuves
Note : L'Impact Estimator ne propose que 3 proportions d'ajouts cimentaires : 9% (moyenne canadienne), 25% et 35%. La MDD est construite avec du béton contenant en moyenne 24,81% de contenu recyclé.	

En plus de mesurer les impacts de certains matériaux constitutifs d'un bâtiment, l'*Impact Estimator* permet d'évaluer ceux relatifs à leur énergie d'opération. Pour la réalisation de ce rapport, celle-ci correspond à la moyenne de consommation d'électricité de 2011 à 2015 et de gaz naturel de 2012 à 2015. Le gaz naturel utilisé lors de la première année d'opération n'a pas été pris en compte à cause d'anomalies du système mécanique du bâtiment durant cette période, ce qui fausserait les données.

La consommation d'énergie du bâtiment référence, quant à elle, est estimée sur la base d'une simulation énergétique d'un bâtiment construit selon le Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNEB) et d'équations destinées à prendre en compte la température extérieure réelle. Un calcul basé sur une simulation énergétique a été réalisé, afin d'estimer la consommation spécifiquement attribuable au chauffage du bâtiment référence, dont la source d'énergie, par convention, est le gaz naturel. Ce choix a une incidence importante sur les résultats, puisqu'en comparaison, la MDD n'a pas utilisé de gaz naturel

pour le chauffage au cours d'une des trois années sur lesquelles sont basés nos calculs.

Au final, la consommation énergétique du bâtiment référence à laquelle on soustrait celle de la MDD représente les économies d'énergie de cette dernière.

Notre analyse comparative entre la MDD et le bâtiment référence exclut par ailleurs des éléments généralement associés aux bâtiments et dont les impacts ne sont pas négligeables, dont :

- Les équipements électromécaniques (sauf pour leurs bénéfices énergétiques)
- Les matériaux de finition
- Les matériaux mineurs (persiennes, solins, etc.)
- Les partitions intérieures
- Le mobilier
- Les impacts relatifs aux activités des occupants, dont leurs déplacements et la génération de matières résiduelles.

La normalisation

Les résultats de l'analyse du cycle de vie peuvent être difficiles à mettre en perspective. Il est néanmoins encourageant d'apprendre que même les praticiens aguerris éprouvent des difficultés à interpréter certains résultats issus de leurs analyses. En réponse à cet enjeu, une méthode fréquemment utilisée est la normalisation des résultats, qui vise à fournir des points de référence communs et une échelle universelle pour un territoire donné, permettant d'envisager plus facilement des résultats présentés dans des unités mal connues.

Les facteurs de normalisation correspondent aux émissions à l'environnement totales attribuables à la production d'un pays divisées par sa quantité d'habitants. Il s'agit donc d'un taux d'émissions par personne. S'il n'est pas possible de comparer, ou d'additionner, les divers impacts d'un matériau parce qu'ils relèvent d'unités de mesure différentes (par ex. : kg éq. CO₂ vs kg éq. SO₂ vs kg éq. PM2.5), il est néanmoins possible d'additionner des « habitants ». Ainsi, si la fabrication d'une fourchette émet la même quantité de kg éq. CO₂ que trois Canadiens pendant une année et la même quantité de kg éq. SO₂ que sept Canadiens pendant une année, il devient possible de dire que cette fabrication aura un impact de 10 « Canadiens/année ». La fourchette pourrait alors par exemple être comparée aux baguettes asiatiques pour l'ensemble de leurs impacts, toutes catégories confondues. Cette approche implique que toutes les catégories d'impacts soient considérées comme équivalentes.

Il est à noter que si certains des inventaires utilisés sont relativement précis et standardisés, comme ceux sur les émissions de GES, d'autres le sont beaucoup moins, comme ceux relatifs aux intrants agricoles, notamment les pesticides. L'ensemble des inventaires ont par contre en commun de provenir d'instances gouvernementales fiables.

Pour la présente étude, les facteurs de normalisation spécifiques à l'ensemble du territoire Canada-États-Unis ont été utilisés.

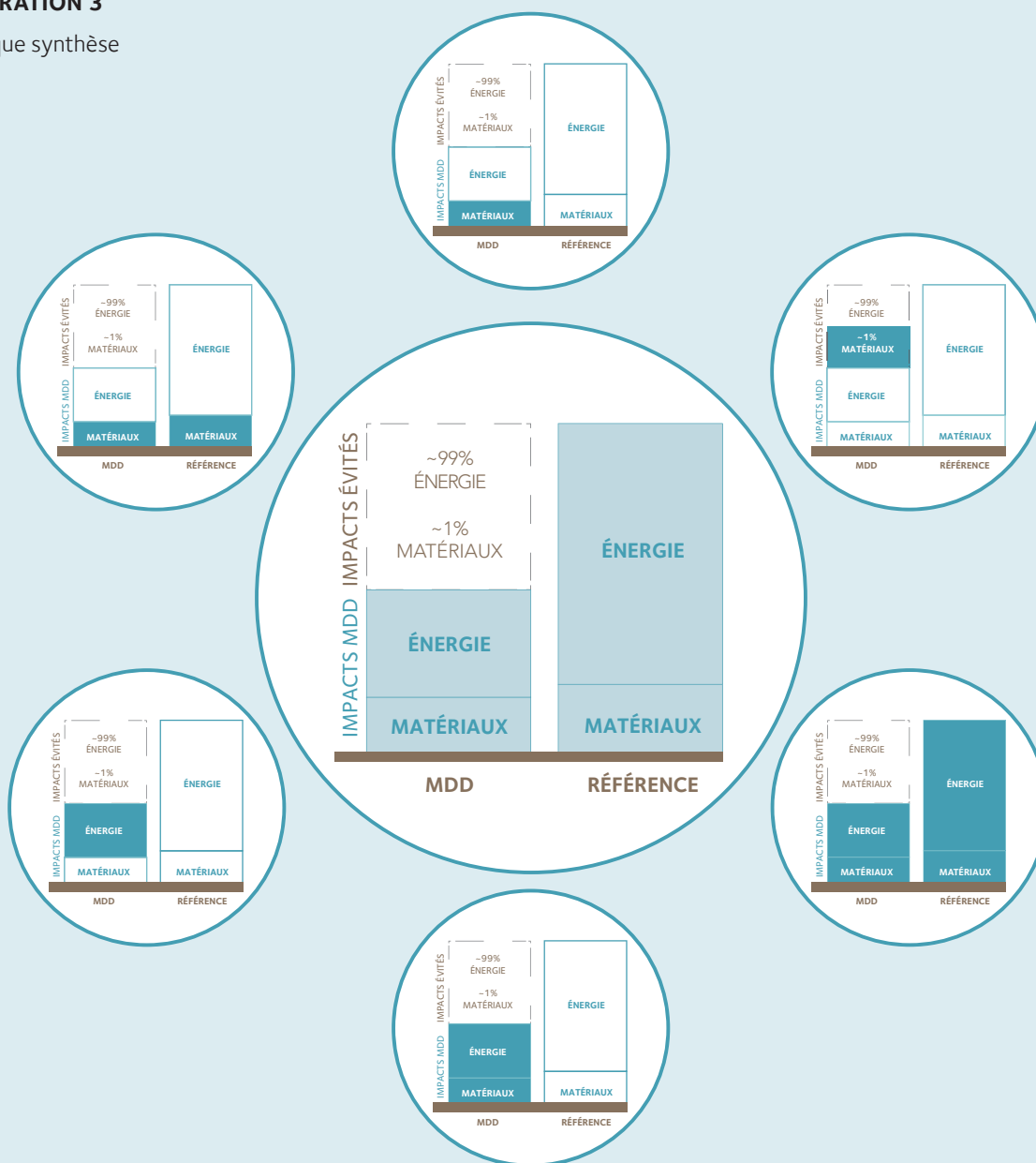
« [...] la normalisation des résultats [...] vise à fournir des points de référence communs et une échelle universelle »

LES RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Les résultats de l'analyse du cycle de vie de la MDD sont présentés sous plusieurs perspectives. Ainsi, nous comparerons les impacts totaux du bâtiment référence avec ceux de la MDD (graphique 1), nous décortiquerons la composante « matériaux » des impacts totaux de la MDD (illustration 3) et celle relative aux énergies d'opération (graphique 5), nous présenterons les impacts évités par la MDD par rapport au bâtiment référence (graphique 7) et nous discuterons de la composante « matériaux » des impacts évités de la MDD (tableau 2). Afin d'aider le lecteur à mieux situer le point de vue particulier de chaque ensemble de données, lorsque pertinent, celles-ci seront présentées en association avec une icône facilitant l'identification de la nature des données. La partie en bleu foncé indique sur quel ensemble de données porte le graphique associé.

ILLUSTRATION 3

Graphique synthèse

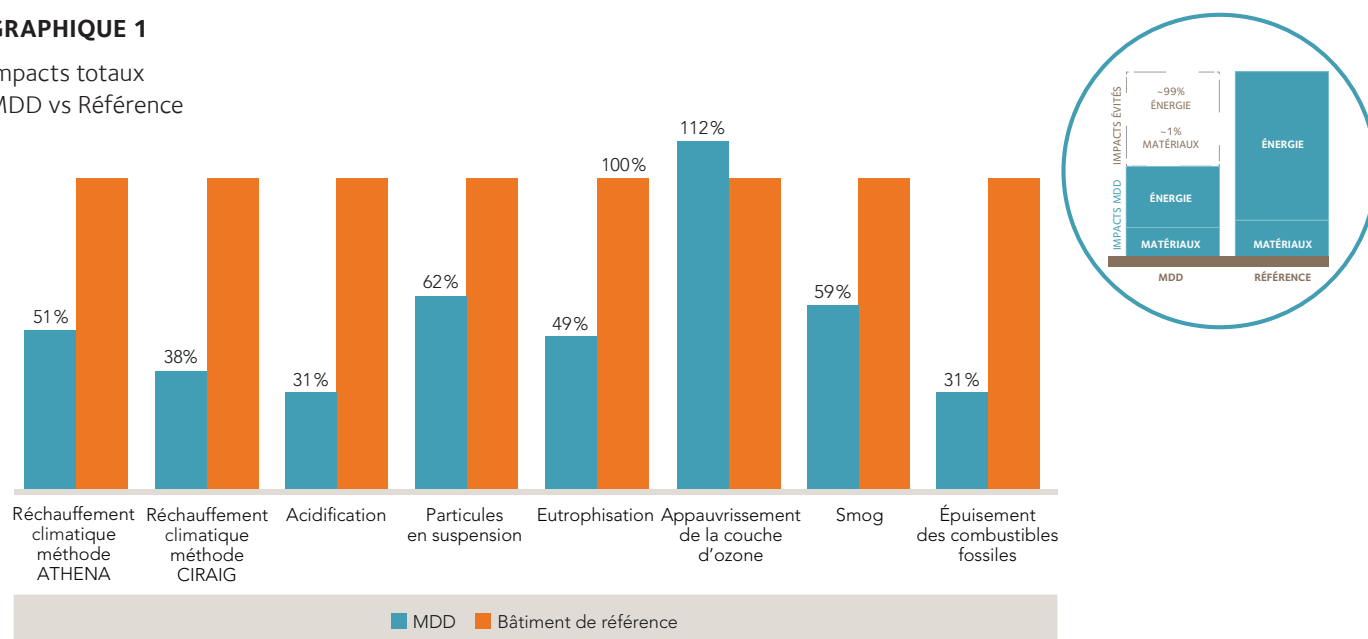


Les impacts environnementaux totaux de la MDD vs bâtiment référence

Le graphique ci-dessous compare les impacts de la MDD à ceux du bâtiment référence, qui par convention sont établis à 100 %.

GRAPHIQUE 1

Impacts totaux
MDD vs Référence



Selon ces données, en matière d'impacts environnementaux, la MDD est nettement plus performante que le bâtiment référence dans l'ensemble des catégories d'impacts, sauf pour l'appauvrissement de la couche d'ozone. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, sur 50 ans, cette performance améliorée impliquerait une réduction de 9 434 tonnes éq. CO₂. À la recherche d'une explication sur les données traitant de la couche d'ozone, nous avons sondé l'Institut Athena, qui a soutenu que généralement, les quantités d'impacts de cette catégorie sont très faibles. Dans le cas présent, ces impacts étaient de 10,8 g éq. CFC-11 pour la MDD contre 9,7 g pour le bâtiment référence. L'Institut Athena qualifie ces quantités de « bruit » et les considère habituellement comme négligeables. Sachant qu'un citoyen moyen du territoire Canada-États-Unis engendre 0,15 kg éq. CFC-11 annuellement [8], la MDD en provoquerait donc 14 fois moins.

L'Institut Athena a récemment calculé que les émissions annuelles de substances appauvrissant l'ozone attribuables à toute l'industrie canadienne

du ciment se limitaient à 11 kg éq. CFC-11, une donnée démontrant que les bâtiments ne sont pas de grands contributeurs à cette catégorie d'impacts [9]. L'appauvrissement de la couche d'ozone serait plutôt le résultat de la production de mousse de polymère, d'aérosols et d'extincteurs à mains ainsi que par l'industrie de l'aviation [8].

Sur cette base, nous avons décidé d'exclure cette catégorie d'impacts des données présentées ci-après.

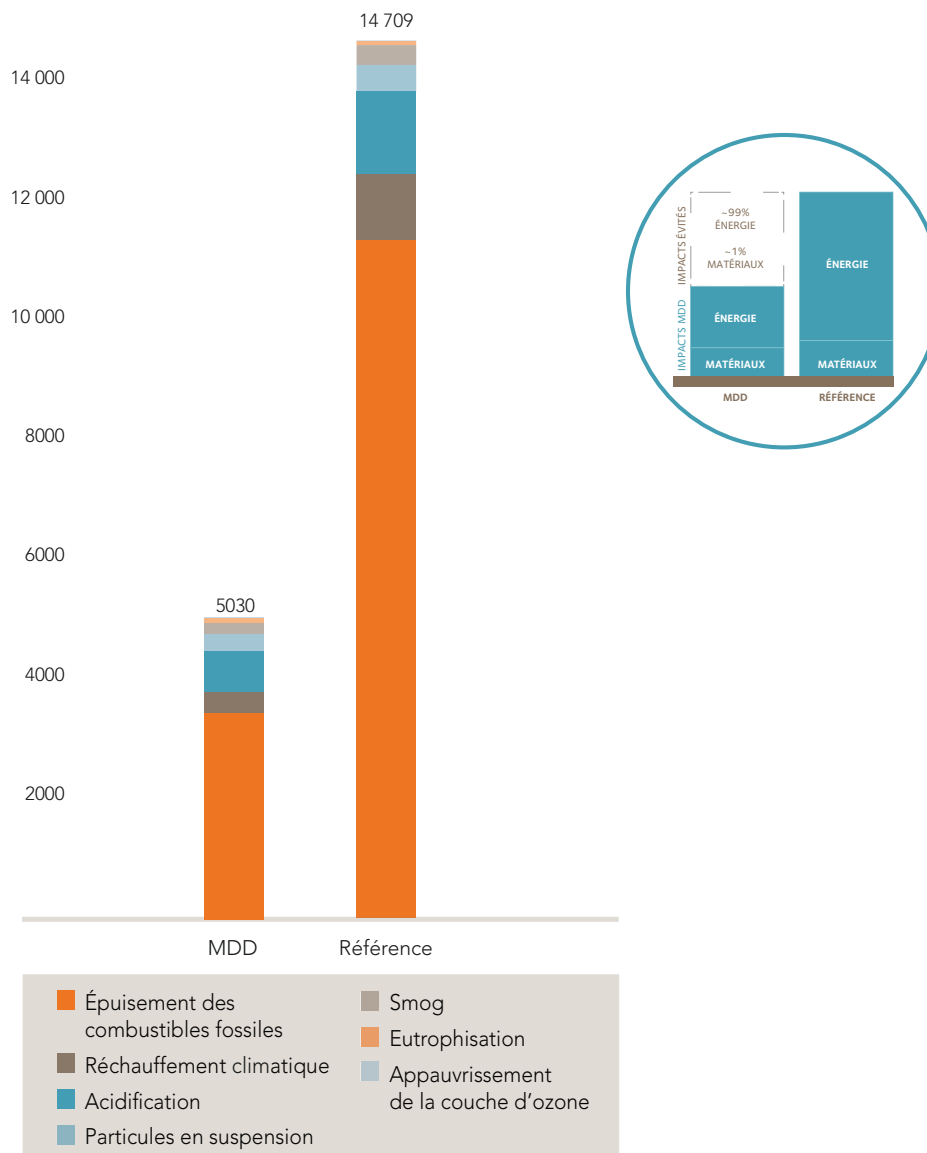
Les impacts normalisés

Comme défini plus haut, l'unité de base des calculs de normalisation correspond à un impact par habitant par année. À titre d'exemple, pour le potentiel de changement climatique, les émissions annuelles de GES du territoire Canada-États-Unis attribuables aux activités de production sont divisées par la population des deux pays, ce qui dans le cas présent donne 24 000 kg éq. CO₂ par habitant [8]. Si la MDD émet 16 783 180 kg éq. CO₂ sur l'ensemble de son cycle de vie, son impact normalisé correspond aux émissions

de 699 habitants/année (16 783 180 divisé par 24 000). Le graphique ci-dessous présente le total des impacts normalisés de la MDD et du bâtiment référence.

GRAPHIQUE 2

Impacts normalisés agrégés
MDD vs Référence



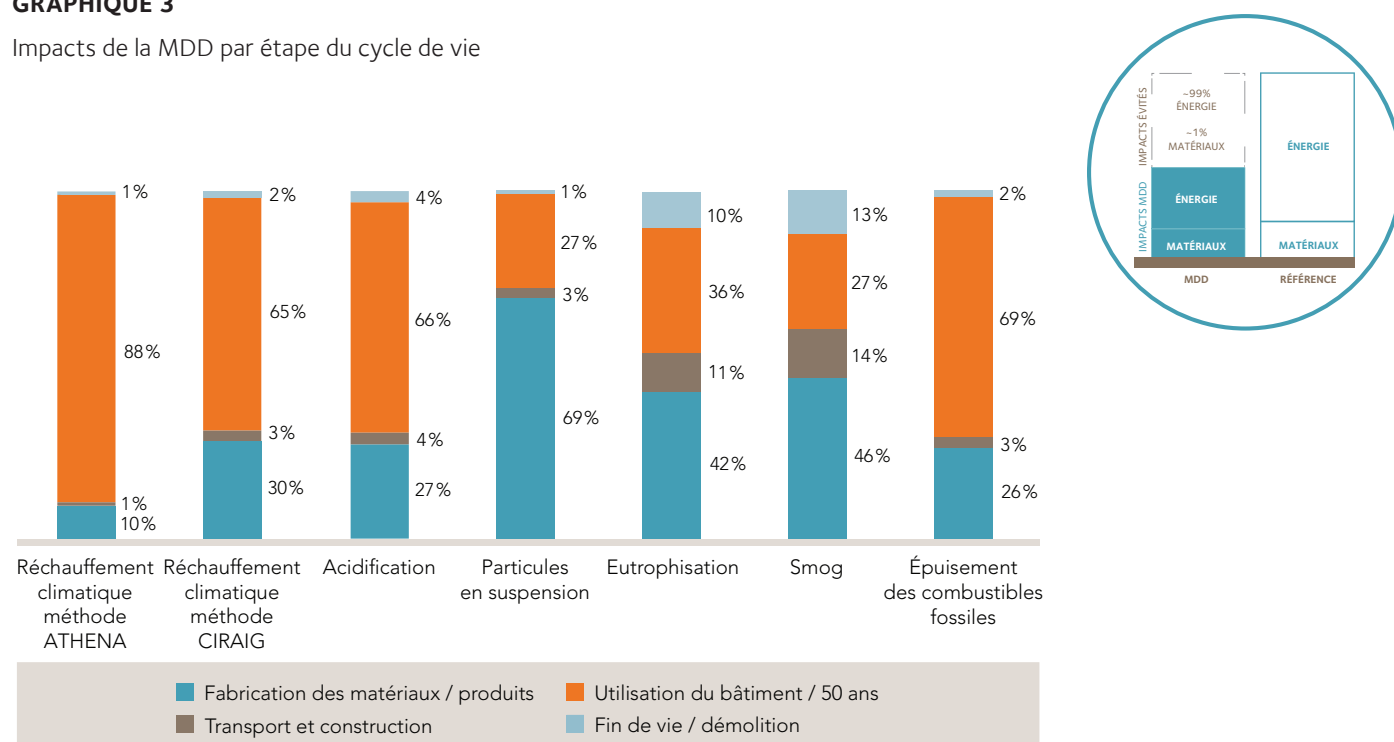
Une fois cumulés par la normalisation, nous découvrons que le bâtiment référence produit 3,27 fois plus d'impacts environnementaux négatifs que la MDD. La performance environnementale supérieure de la MDD provient en grande partie de sa faible utilisation de combustibles fossiles.

Les impacts environnementaux par étape du cycle de vie

Le graphique ci-dessous présente les impacts environnementaux de la MDD répartis selon les 4 grandes étapes du cycle de vie d'un bâtiment.

GRAPHIQUE 3

Impacts de la MDD par étape du cycle de vie



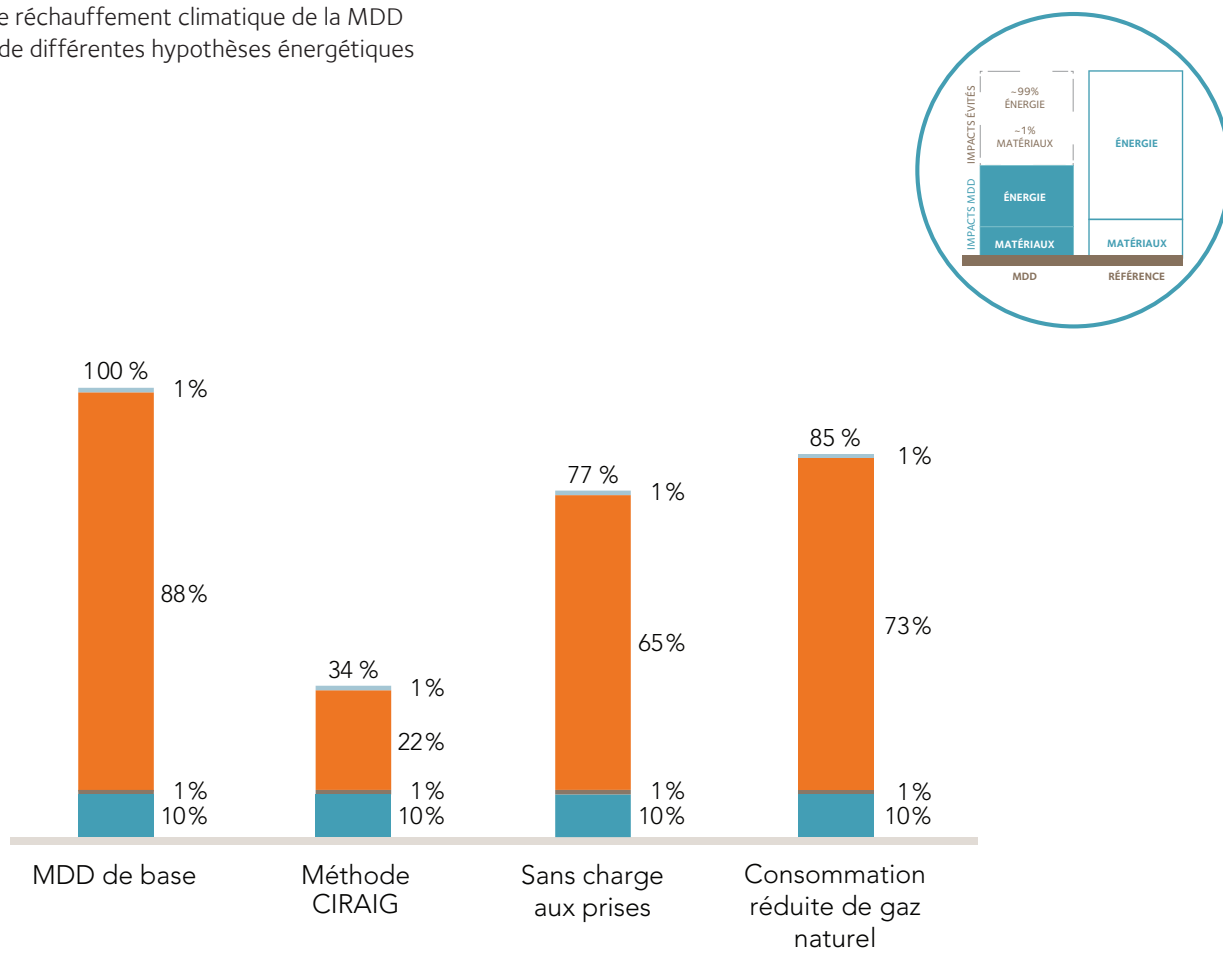
Ce graphique indique que les étapes du cycle de vie d'un bâtiment génèrent des émissions à l'environnement dans des proportions variables selon la catégorie d'impacts considérée. Si l'épuisement des combustibles fossiles et le réchauffement climatique semblent fortement dépendants de la phase « utilisation du bâtiment », malgré l'usage important de l'électricité comme source d'énergie pour la MDD, l'eutrophisation et le smog semblent quant à eux beaucoup plus influencés par les étapes du transport et de la fin de vie que les autres catégories d'impacts. Quant à elles, les particules en suspension paraissent fortement tributaires de la phase de fabrication des matériaux.

Ces résultats suggèrent que toute analyse d'impacts environnementaux basée sur une seule étape du cycle de vie générera des résultats biaisés. Ainsi, choisir un matériau sur la base de sa recyclabilité, par exemple, implique un biais légèrement favorable à des économies d'émission de composés générant le smog. Dans une société obnubilée par les changements climatiques, l'attention des concepteurs devrait donc essentiellement se concentrer sur la phase d'utilisation des bâtiments et donc, mener à des investissements en efficacité énergétique, une telle décision pouvant néanmoins entraîner des augmentations d'impacts dans d'autres catégories. Cette conclusion, tirée de données issues d'un bâtiment priorisant l'électricité, prend encore plus d'importance dans le cas d'un bâtiment misant sur le gaz naturel pour son chauffage.

La place prépondérante occupée par la phase d'utilisation du bâtiment dans la répartition globale de ses impacts, essentiellement attribuable à son énergie de fonctionnement, a soulevé des questions au sujet de l'influence de certaines variables énergétiques sur les résultats. Dans ce contexte, nous avons voulu connaître la part de l'impact environnemental total du bâtiment spécifiquement attribuable à la consommation électrique des appareils branchés dans les prises électriques. Pour ce faire, nous avons évalué la consommation issue des prises de courant à 30 % de la consommation électrique totale de la MDD, une valeur déterminée de façon conservatrice sur la base des résultats préliminaires d'une campagne de mesurage réel effectuée dans le bâtiment puis confirmée suite à la consultation de plusieurs sources sérieuses et indépendantes. Nous avons également voulu connaître l'effet de la réduction drastique de gaz naturel utilisé par le bâtiment à la suite des travaux d'ajustement mécanique effectués à la fin de 2014. La colonne de droite du graphique ci-dessous émane ainsi de calculs basés sur la consommation réelle de l'année 2015 (3084 m³), alors que la colonne de gauche (le modèle utilisé partout dans le présent rapport) est issue d'une moyenne des années 2012 à 2015 (17 628 m³). La consommation de 2 758 m³ de gaz naturel pour l'année 2016, une donnée qui n'était pas disponible au moment de la réalisation de la modélisation Athena, confirme les gains significatifs dont nous tentons d'évaluer les conséquences ici.

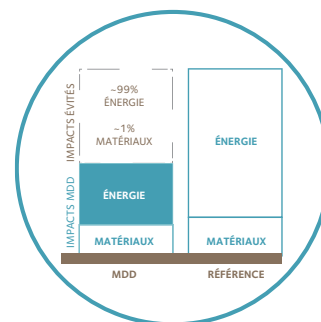
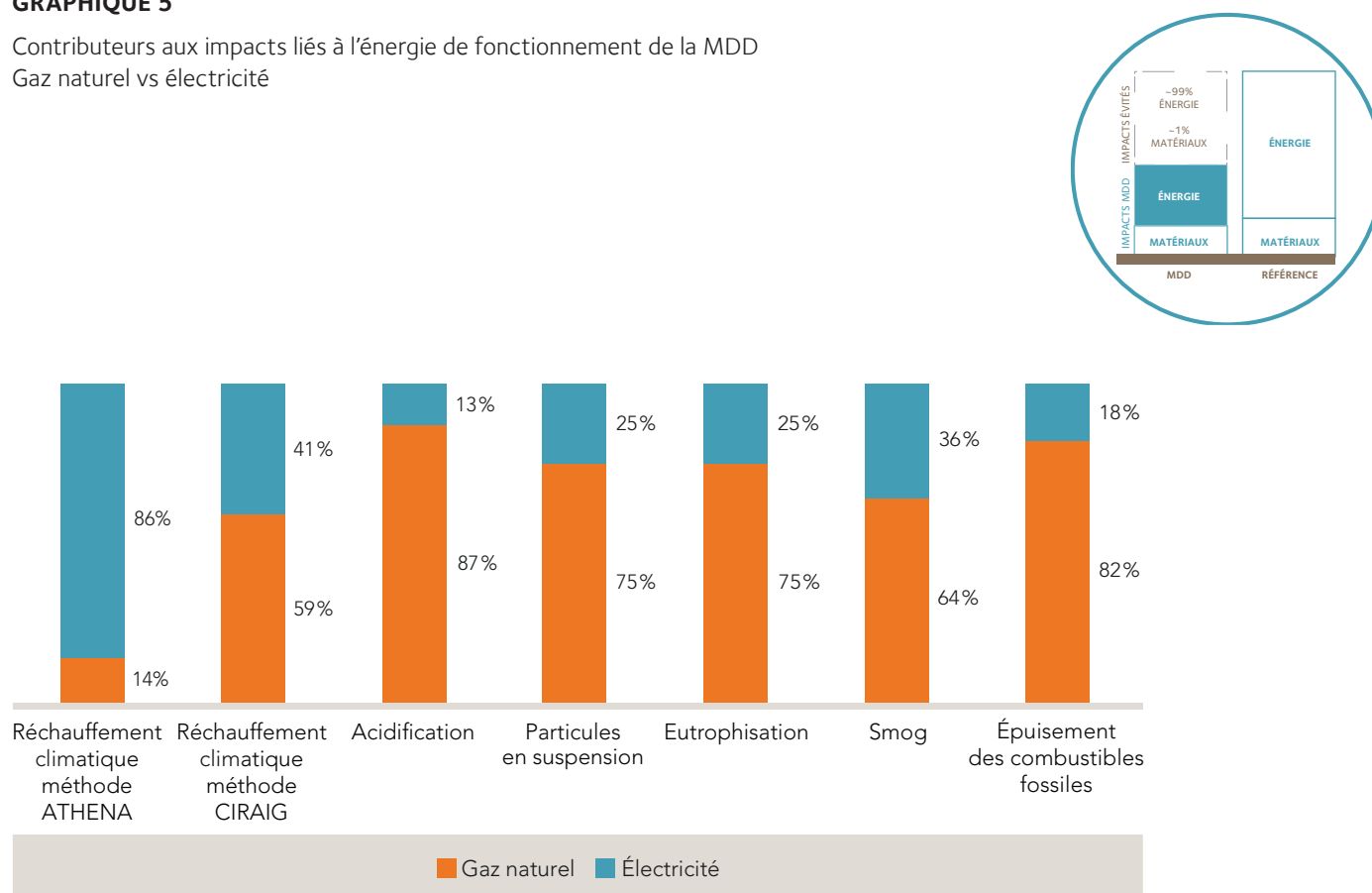
GRAPHIQUE 4

Potentiel de réchauffement climatique de la MDD
Évaluation de différentes hypothèses énergétiques



GRAPHIQUE 5

Contributeurs aux impacts liés à l'énergie de fonctionnement de la MDD
Gaz naturel vs électricité

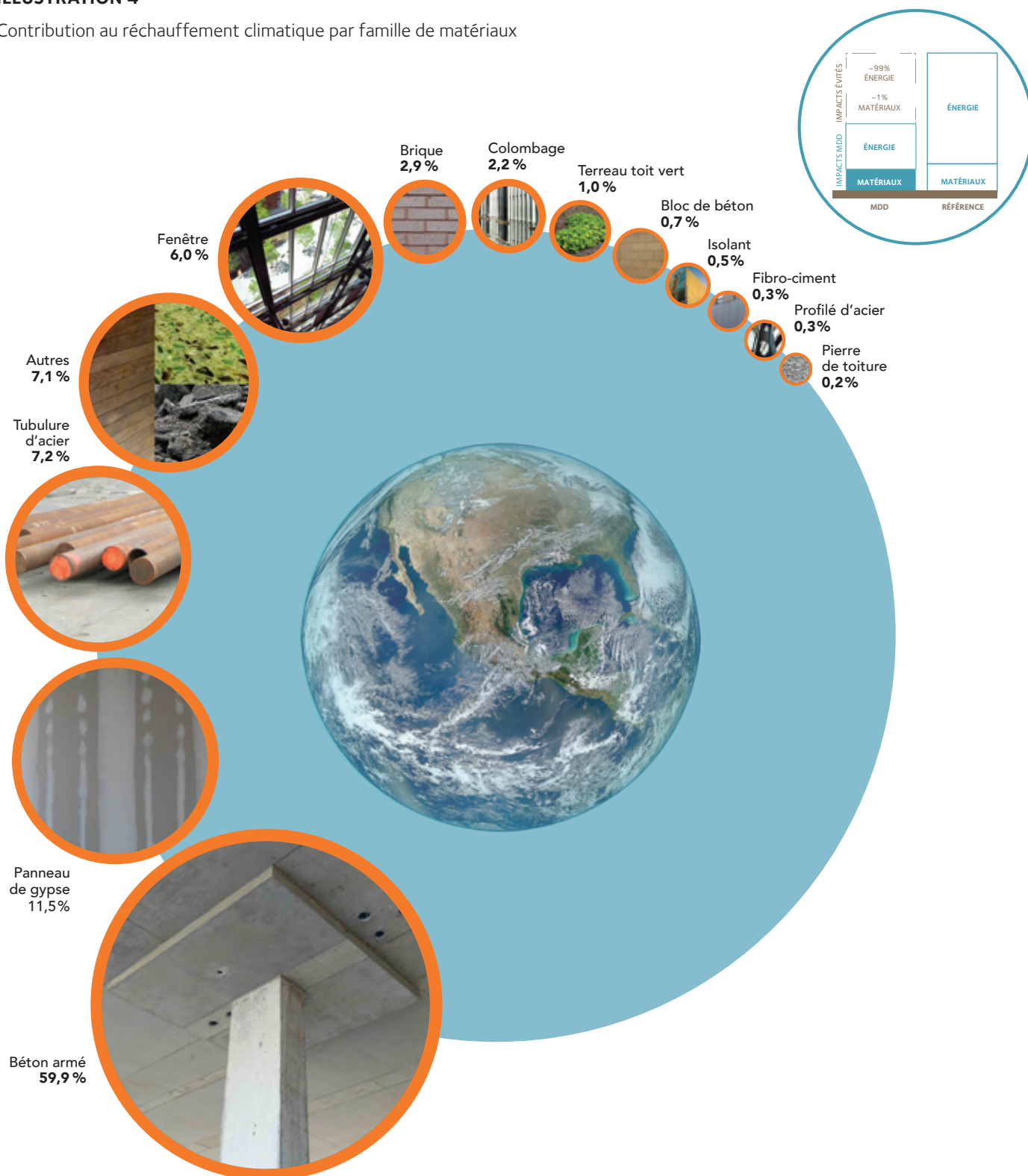


Les émissions de GES attribuables aux matériaux

L'illustration ci-dessous décortique les émissions de GES attribuables aux matériaux utilisés pour faire la MDD.

ILLUSTRATION 4

Contribution au réchauffement climatique par famille de matériaux



La part du béton, 60 % du total des émissions de GES attribuables aux matériaux de la MDD, tient compte du remplacement de 25 % du ciment du bâtiment par des cendres volantes et, en conséquence, est sans doute inférieure à celle d'un bâtiment conventionnel comptant moins d'ajouts cimentaires. L'*Impact Estimator* utilise 9 % d'ajouts cimentaires comme valeur par défaut pour le béton canadien.

La contribution du gypse aux émissions de GES, à 12 %, est quant à elle assez inattendue. Si l'*Impact Estimator* permet de sélectionner le niveau d'ajouts cimentaires dans le béton à l'étude, le logiciel n'offre pas d'option similaire pour les panneaux de gypse, il devient par conséquent difficile de déterminer le pourcentage de contenu recyclé des panneaux de gypse qu'il utilise par défaut. Il est tout de même probable que ce dernier renferme un contenu recyclé inférieur à celui utilisé dans la MDD (98 %).

Par ailleurs, la MDD compte 161 pieux d'acier de 10 à 12 pouces de diamètre plantés à une profondeur approximative de 13 mètres sous la base des colonnes, d'où l'importance relative des émissions de GES générées par la tubulure d'acier (7 %). À titre comparatif, le plus haut bâtiment du monde, la tour Burj Khalifa, à Dubaï, repose sur 194 pieux de 1,5 mètre de diamètre et de 43 mètres de profondeur [10].

ILLUSTRATION 5

Quelques pieux de la MDD



L'importance des impacts relatifs à la fenestration (6 % du total) est surprenante. Cette valeur, qui ne tient pas compte des pertes énergétiques occasionnées par son utilisation, correspond presque au double de l'impact des panneaux de fibrociment et de la brique combinés (3,2 %), qui à eux deux couvrent 1,52 fois plus de surface sur le bâtiment que les fenêtres.

Le cas du terreau du toit vert est également intéressant, alors que ses émissions de GES atteignent 1 % des émissions totales du bâtiment, cela malgré le fait qu'il n'ait que 7 cm d'épaisseur et soit vraisemblablement constitué de terre.

La petite histoire des revêtements extérieurs

Les revêtements extérieurs de la MDD ont une histoire intéressante entre autres parce que les processus décisionnels ayant mené aux choix finaux ont sollicité une implication directe du promoteur du projet, Équiterre.

À l'étape de la planification conceptuelle, les architectes du projet ont suggéré l'utilisation de morceaux de conteneurs comme élément signature des façades. Malgré l'intérêt suscité par la symbolique de la réutilisation, une brève analyse a démontré les points faibles de cette approche. Parmi ceux-ci, le message social inapproprié consistant à utiliser des conteneurs maritimes en bâtiment pour dégager de leurs responsabilités environnementales des compagnies maritimes peu enclines à rapatrier leurs conteneurs dans les pays manufacturiers, l'illogisme de faire usage en construction écologique de conteneurs répondant encore parfaitement à leur fonction originale et l'incohérence environnementale d'utiliser des panneaux d'acier « structuraux » comme revêtement extérieur (l'épaisseur des parois de conteneur est de 2 mm alors que celle d'un revêtement métallique architectural sera de 0,4 à 0,9 mm). La proposition a donc été rejetée.

ILLUSTRATION 6

Maquette de la MDD avec panneaux de conteneurs



À l'étape des dessins préliminaires, les architectes de la MDD ont proposé d'utiliser deux matériaux de revêtement extérieur : des panneaux de fibrociment fabriqués en Autriche et une brique noire provenant des États-Unis. D'emblée, sentant le besoin de développer de solides arguments pour justifier le choix des matériaux d'enveloppe — un élément significatif de son image publique — Équiterre a préféré, quand des matériaux locaux équivalents existaient, lancer un message d'achat local. La brique noire américaine a donc été refusée. Le produit autrichien, quant à lui, a été accepté sur la base de la très haute opinion qu'avaient nos architectes de ses qualités intrinsèques, telles que son esthétisme, la durabilité de sa coloration, sa légèreté, sa durée de vie et sa faible énergie intrinsèque.

En remplacement de la brique noire refusée, les architectes ont proposé deux produits d'argile fabriqués dans l'est du Canada : l'un provenant de la région de Montréal et l'autre de Nouvelle-Écosse, le tout accompagné d'une forte recommandation en faveur de cette dernière. Équiterre a accepté la brique de Nouvelle-Écosse à condition qu'elle soit livrée par train ou par bateau; une exigence qui a dû être démontrée par l'entrepreneur.

ILLUSTRATION 7

Preuve de livraison de la brique par train

IN INTERMODAL
DELIVERY RECEIPT
RÉCÉPISSÉ DE LIVRAISON

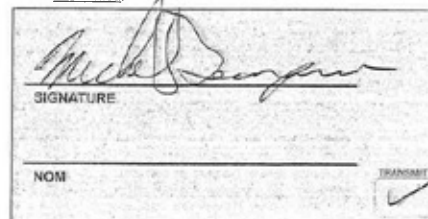
NRU 235748
aybill Date/Data FR: 20110125114636
aybill No/No FR: 286100
aid Status/État paiement: PREPAID
est/Dest:
rigin/Origine: HALINTTENS
lan/Serv: 20
elivery/Livraison #: 01
hipper/Expéditeur:
HAW BRICK LTD
101 SHAW DRIVE
ALIFAX INTER TERM NS
onsignee/Destinataire:
HAW BRICK LTD
070 MONTEE MASSON
ILLE DE LAVAL PQ
tore/Mag:
hone/Tel:
pecial Handling/Instructions spéciale
OK TO LOAD
esc. of Articles/Desc. des articles:
CNT BUILDING BRICK, COMMON ORFA
E, HOLLOW, CLAY OR SHALE, NOT ENAMEL
D NOR GLAZED
UILDING BRICK, COMMON ORFACE, HOLLOW
CLAY OR SHALE, NOT ENAMELED NOR
LAZED
TORE TIME ZONE/RLSE DATE TT
HIPPER'S IDENTIFYING NO 70729
eight/Poids : 60000
otified Time/Hre avis:
ppt Tm/Hre rendez-vs : 2011/01/27 08:
0
ctif. Nme/Pers-ress:
rop/Stay-Déch/Att :
elpers/Aides :
/L Num-Numéro B/L : 70729
ertified/Certifié :
0:
0:
0:
0:
arter/Camionn : CQNL BM21
ngate Seal/Plomb guér :
aybill Seal/Plomb FR :
emarks:
elivery Date:
ustomer Arrival Time:
ustomer Placement Time:
ustomer Departure Time:
ustomer Signature:
river Signature:
lease report any damage to lading
bjected to transportation claims to
at PHONE:800-667-8778.
pplicable liability regulations will
ply. All damaged product must be
entified on this Delivery Receipt
rich must be returned to the
driver.
ady for pick-up, phone 866-896-6601



Confirmation de livraison

La signataire ci-dessous accepte la livraison du chargement de l'unité décrite ci-dessus. Cette signature tient lieu de confirmation de livraison du présent envoi pour les entreprises indiquées sur le connaissance.

Lorsqu l'unité sera vide, veuillez le signaler en ligne au www.cn.ca, par courriel à cnroc-releases@cn.ca ou par téléphone au 1-866-896-6601. Après la livraison, une copie du récépissé de livraison deviendra disponible sur le site www.cn.ca.



Tout excédent, toute perte ou tout dommage observé à la livraison doit être signalé après le départ du conducteur effectuant la livraison. Tout dommage constaté après le départ du conducteur doit être signalé immédiatement à notre bureau des réclamations en ligne au www.cn.ca ou au numéro 1-800-667-8778.

Les économies d'émissions de GES attribuables au transport de la brique de la MDD par train, comparé au camion habituellement utilisé pour de telles cargaisons sur de telles distances, s'élèvent à 3,8 tonnes, ce qui équivaut presque à une voiture typique parcourant 20 000 kilomètres [11].

Ces discussions sur la provenance de la brique, le moyen utilisé pour son transport et l'intégration d'un produit autrichien dans notre bâtiment écologique ont suscité de tels questionnements qu'Équiterre a commandé à l'Institut Athena une analyse du cycle de vie comparative des matériaux d'enveloppe sélectionnés pour son projet [12] (voir encadré sur les données génériques ci-contre). Afin de représenter ces impacts le plus fidèlement possible, cette évaluation devait prendre en compte des données spécifiques aux matériaux choisis. Les fabricants ont donc été questionnés afin de modéliser leurs processus de production réels et d'estimer précisément les quantités d'intrants impliquées. Cette méthode, reposant sur un inventaire du cycle de vie représentant des données spécifiques, s'éloigne sensiblement des mécanismes habituels de l'*Impact Estimator*, basés sur des données génériques.

LES DONNÉES GÉNÉRIQUES

Dans le cas de l'*Impact Estimator*, les données génériques impliquent la création de modélisations de matériaux élaborées à partir des données disponibles reflétant le contexte états-unien ou canadien, mais assimilables en bout de compte à des moyennes régionales.

À titre d'exemple :

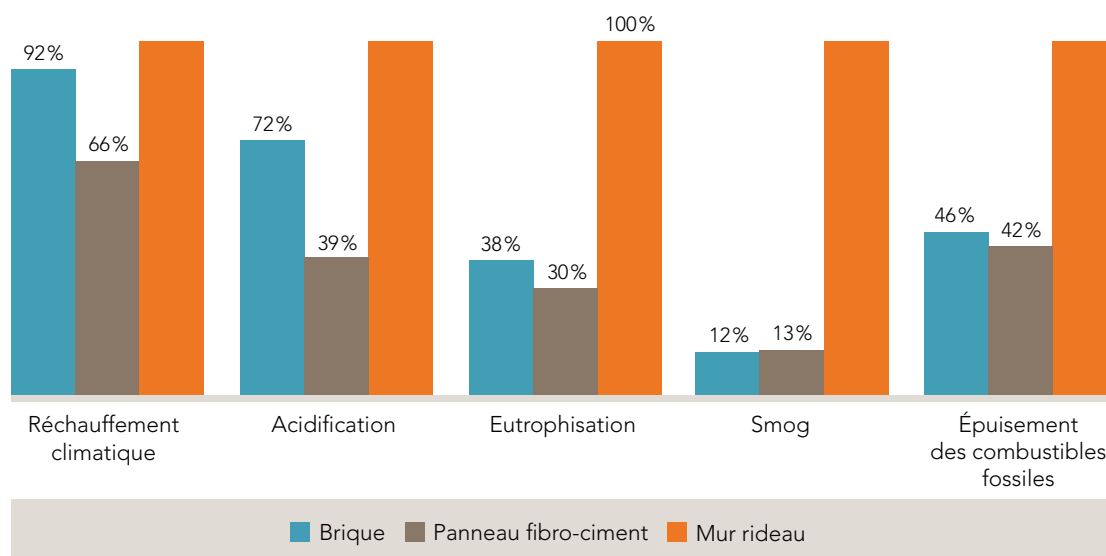
- Les impacts relatifs aux briques d'argile sont estimés à partir de données canadiennes développées en 1997 puis mises à jour en 2009. Les données des projets américains sont adaptées pour tenir compte des différences de portefeuilles énergétiques et des distances de transport. L'*Impact Estimator* ne contient donc qu'un seul modèle de brique d'argile pour l'Amérique du Nord, lequel a été développé à partir de données issues de plusieurs des plus importants fabricants [13].
- Les impacts relatifs aux panneaux de gypse sont estimés à partir de données initialement développées en 1997. Les données sur les panneaux réguliers et résistants au feu ont été mises à jour en 2012 [14].

L'Institut Athena a déterminé que la portée de cette étude pourrait se limiter aux étapes du cycle de vie allant de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de la phase de construction. L'exclusion des étapes ultérieures a été justifiée sur la base de l'équivalence de la durée de vie théorique des matériaux ; une position potentiellement désavantageuse pour la brique, dont la durée de vie prévue, selon certains experts, excède celle du panneau de fibrociment. En effet, Patenaude Trempe Inc., l'entreprise retenue par la MDD pour réaliser son plan de durabilité de l'enveloppe du bâtiment, sur la base de « performances historiques », donc démontrées dans la pratique, a estimé la durée de vie de la brique à 100 ans et celle des panneaux de fibrociment à 50 ans, bien que la longévité réelle de ce dernier soit mal connue à cause de son origine plus récente. Le gaz naturel, la source d'énergie par défaut du modèle de fabrication de la brique de l'*Impact Estimator*, a par ailleurs été remplacé par du mazout pour tenir compte des procédés de fabrication réels de cette brique. À titre indicatif, soixante-deux litres de mazout sont nécessaires pour fabriquer une tonne de ces briques.

Le graphique ci-dessous compare des résultats d'ACV pour de la brique (MDD), des panneaux de fibrociment (MDD) et un mur rideau (générique), une autre composante importante du revêtement de la MDD.

GRAPHIQUE 6

Impacts de différents matériaux de revêtement



Les panneaux de fibrociment de la MDD présentent une meilleure performance environnementale que la brique pour quatre des cinq catégories d'impacts incluses au graphique ci-dessus. La différence de 1 % dans la catégorie « potentiel de smog » paraît quant à elle négligeable. Le graphique illustre par ailleurs de façon évidente la piètre performance des murs rideaux comparée à celles de solutions opaques comme la brique et les panneaux de fibrociment. Cette conclusion, par contre, n'est pas tout à fait équitable puisque le mur rideau remplit deux fonctions (revêtement et isolation) alors que les deux autres matériaux n'en remplissent qu'une seule (revêtement). En d'autres mots, les matériaux du mur rideau polluent plus, mais ils entraînent aussi des économies d'énergie significatives pendant leur utilisation, ce qui n'est pas le cas des matériaux de revêtement. Pour équilibrer la comparaison, l'inclusion de l'impact des matériaux isolants dans les modélisations des murs opaques aurait en contrepartie nécessité la prise en compte de leur impact énergétique, des données pour le moment inexistantes. Par ailleurs, le mur rideau de la MDD étant à triple vitrage, il entraîne plus d'impacts environnementaux lors de sa fabrication que celui à double vitrage modélisé par l'*Impact Estimator*, une situation favorable au mur rideau générique présenté dans le graphique comparé au vrai produit installé dans la MDD.

Des enjeux de gypse

Pour deux raisons, il semble important de porter une attention particulière au choix du gypse lors de la construction d'un bâtiment :

- Une quantité impressionnante de ce matériau est requise (190 tonnes pour la MDD)
- Des différences environnementales simples, mais significatives distinguent les produits offerts. D'un point de vue environnemental, les panneaux de gypse disponibles sur le marché québécois s'articulent autour de deux familles d'enjeux : le transport et le contenu recyclé. Les trois

fournisseurs envisagés pour le projet produisaient à l'époque des panneaux de gypse à très fort contenu recyclé (96 %-98 %). Le gypse synthétique, produit par les procédés de désulfuration des centrales au charbon et au mazout, n'étant pas facilement disponible partout, le pourcentage de contenu recyclé des panneaux de gypse peut varier considérablement d'une usine à l'autre. À titre d'exemple, les fiches de déclaration environnementale des panneaux de gypse résistants au feu et produits par CertainTeed indiquent que la production issue des usines de Carrollton (KY), Moundsville (WV) et Roxboro (NC) ont un contenu recyclé de 99 % [15] alors que celle de Toronto est de 76 % [16] et celle de Seattle-Vancouver, 26 % [17].

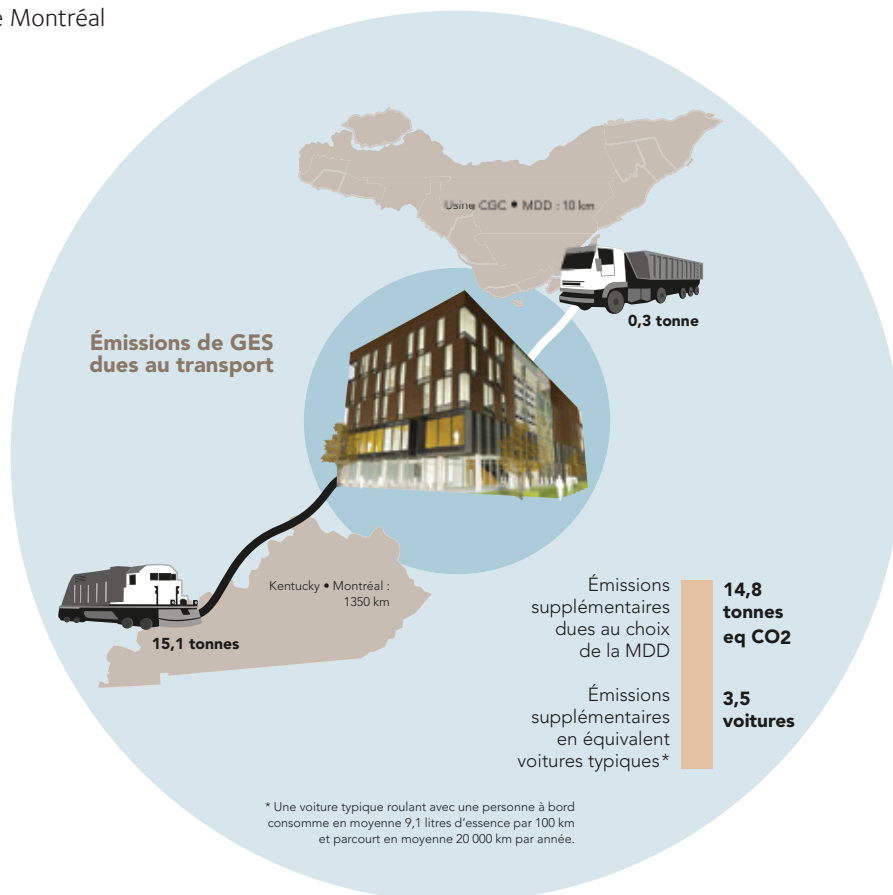
Dans une logique de réduction des impacts du transport et de l'extraction de matières premières, Équiterre a demandé que le gypse fabriqué par CGC à Montréal soit utilisé, un produit constitué à 98 % de matières recyclées. Or, l'équipe de projet a préféré le produit de Lafarge, fabriqué à 1 350 km de Montréal, à celui de ses concurrents CGC et CertainTeed. Les raisons suivantes ont joué en faveur de Lafarge : une fiche d'informations LEED® incomplète de CGC, des informations émanant directement de CertainTeed rendant son produit inéligible pour le crédit LEED® MR5.2 (matériaux régionaux), mais surtout, les liens d'affaires existants entre Lafarge et RONA, un donateur du projet qui a souhaité réaliser une partie de sa contribution en matériaux, dont les panneaux de gypse.

L'impact de cette décision est présenté dans l'illustration ci-dessous.

ILLUSTRATION 8

Impact du lieu de fabrication

Usine Lafarge au Kentucky vs usine CGC de Montréal



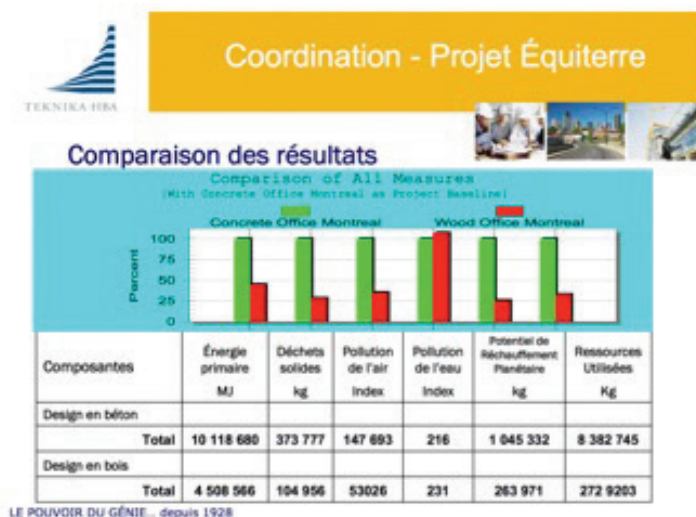
Une question de structure : bois vs béton

La question de l'approche structurale à privilégier étant un incontournable lors de la conception d'un bâtiment durable, même pour un immeuble projeté de six étages, dans l'histoire du projet, Équiterre a été prompte à proposer l'utilisation d'une structure en bois. Cette idée, sur la base d'enjeux réglementaires relatifs au Code de construction du Québec, a été qualifiée d'impossible à réaliser par certains professionnels de l'équipe de conception.

Cette importante question aurait pu se conclure ainsi, n'eût été l'intervention particulièrement pertinente du coordonnateur en développement durable, engagé pour dynamiser le dialogue et la réflexion sur les enjeux environnementaux. Ce dernier a mandaté l'Institut Athena afin d'évaluer sommairement les impacts de différentes approches structurales. Voici la diapositive originale utilisée pour présenter les résultats à l'équipe de conception :

ILLUSTRATION 9

Diapositive originale
Résultat de l'ACV structure en béton vs bois



Ces données, construites à partir des méthodes de calcul d'Athena et portant uniquement sur les impacts attribuables aux matériaux, illustrent qu'une structure en bois constituerait une meilleure solution environnementale qu'une structure en béton. Cette démonstration en apparence sans équivoque aura permis de convaincre l'équipe de projet d'envisager sérieusement l'option d'une structure en bois, une évolution menant à la nécessité de mieux circonscrire les contraintes réglementaires y étant associées. Les experts-conseils en codes du bâtiment du Groupe CSB, mandatés pour conseiller l'équipe sur ces questions, ont alors statué qu'une structure de six étages en bois était possible, moyennant l'obtention d'une dérogation relative à certains enjeux de sécurité incendie. Ils prévoyaient que l'obtention d'une telle dérogation nécessiterait la mise en place des stratégies suivantes :

- Ignifugation des éléments structuraux apparents
- Création d'un mur d'eau dans l'atrium
- Surdimensionnement du système de gicleur

Selon l'évaluation approximative du Groupe CSB, les coûts associés à l'implantation de ces mesures excédaient deux millions de dollars alors que des délais de 6 à 8 mois étaient à prévoir pour conclure un processus dérogatoire dont le résultat positif ne pouvait être garanti. Ainsi, après des investissements importants en argent et en temps, il demeurerait possible que la MDD n'obtienne pas sa dérogation et ne soit donc pas autorisée à construire un bâtiment de six étages à structure de bois.

Une liste des avantages et contraintes de chaque option de structure envisageable dans le contexte du projet a alors été produite. Une synthèse des éléments de cette liste pour les approches en bois et en béton est présentée ci-dessous. L'analyse d'une option innovatrice en béton (*bubble deck*) et de l'approche en acier, toutes deux considérées sérieusement au moment de la conception, ont néanmoins été exclues du tableau parce que jugées moins pertinentes pour le présent rapport.

TABLEAU 2

Synthèse de l'étude structurale

Charpente de bois

AVANTAGES	CONTRAINTES
Possibilités architecturales intéressantes	Disponibilité limitée d'entrepreneurs qualifiés pour 6 étages
Valeur esthétique ajoutée par la structure apparente	Délais de fabrication/livraison élevés (2-4 mois)
Aspects environnementaux avantageux	Retrait dû au séchage du bois d'œuvre
Légèreté de la superstructure	Écrasement du bois ($\pm 3,2$ mm / étage)
	Grande dimension des colonnes / respect critères d'élancement
	Vibrations excessives des planchers
	Limites de conception: Protection incendie vs hauteur du bâtiment (article 3.2.2.2.51. du CNBC 1995)
	Limitation des portées (problématique d'aménagement des salles de conférence et CPE)
	Profondeur importante des membrures du plancher
	Ignifugation des assemblages d'acier et des planchers
	Surdimensionnement des membrures pour résistance au feu
	Installation improbable des supports pour maçonnerie
	Émanation de COV (Lamellé-collé)
	Coûts de construction élevés

Charpente de béton

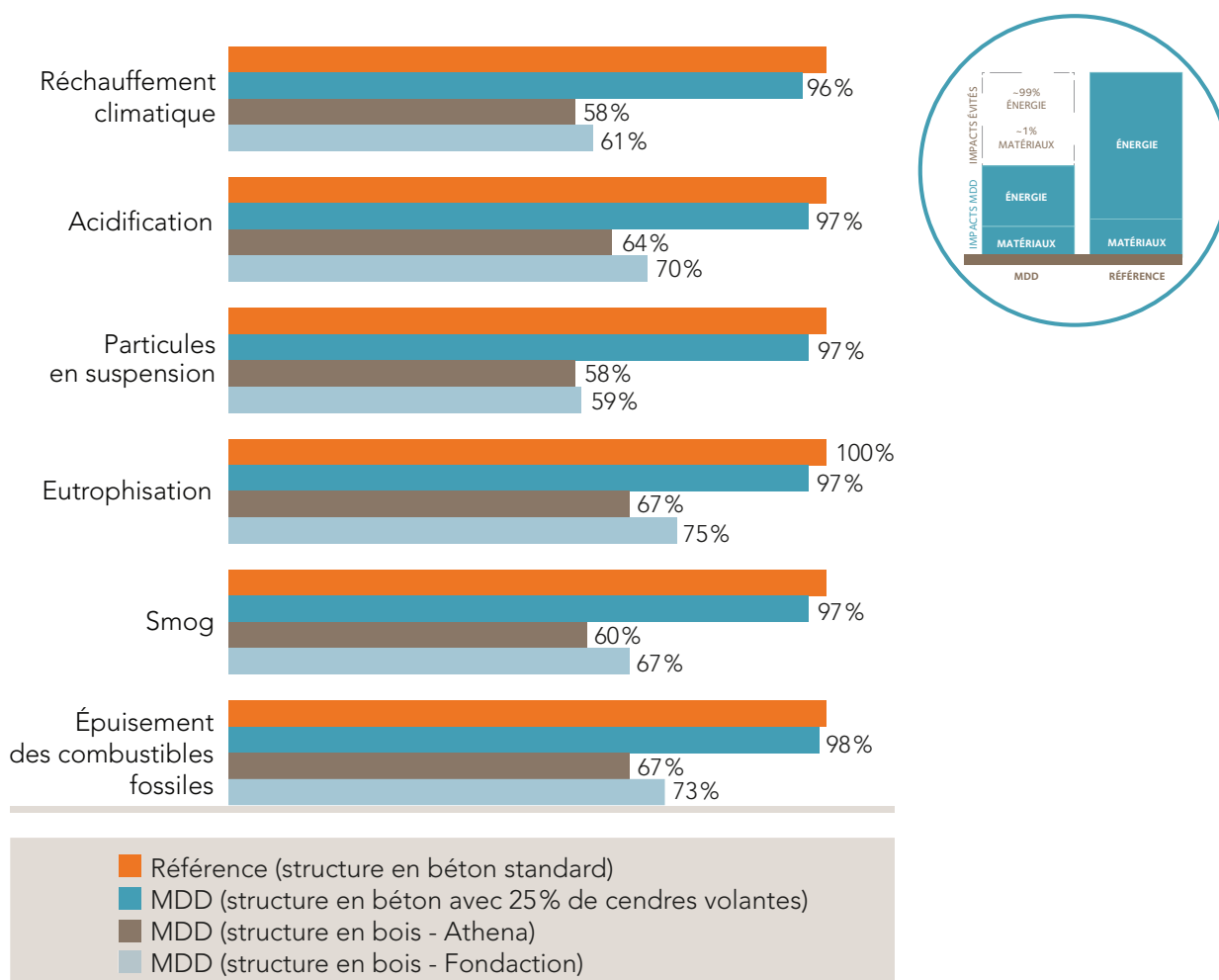
AVANTAGES	CONTRAINTES
Faible profondeur des éléments de plancher	Dégagement de poussière tout au long de la durée de vie
Maximisation des portées	Consommation d'énergie et émissions de CO2 importantes
Stockage de l'énergie (masse thermique)	
Uniformité et résistance des surfaces	
Ignifugation de la charpente apparente non requise	
Disponibilité des matériaux et de la main-d'œuvre	
Qualité supérieure du bâtiment	
Implantation facile du système de résistance aux charges latérales	
Cages d'escalier et d'ascenseur	
Un seul système de construction	

- Scénario référence : structure de béton avec 9 % de cendres volantes (la moyenne canadienne, selon l'Institut Athena)
- MDD réelle : le béton avec 25 % de cendres volantes
- MDD hypothétique avec une structure de bois, telle que modélisée directement par l'*Impact Estimator*
- MDD hypothétique avec une structure de bois modélisée par l'*Impact Estimator*, mais avec une quantité de bois équivalente à celle utilisée pour l'édifice Fondation, à Québec [18]. En effet, pour des raisons que nous n'avons pas réussi à élucider, la réalisation de cet édifice de six étages a nécessité 1,94 fois plus de bois par unité de surface que ce que l'*Impact Estimator* prévoit par défaut pour une telle structure. Les données présentées excluent les impacts attribuables à l'énergie d'opération.

Le graphique ci-dessous présente les résultats de notre analyse de différentes approches structurales, soit :

GRAPHIQUE 7

Comparaison d'approches structurales
Béton et bois



À première vue, donc, l'approche structurale en bois apparaît plus performante en terme environnemental que celle en béton. Cette conclusion étant déjà connue à l'époque de la conception de la MDD, comment son équipe de réalisation en est-elle venue à privilégier une structure en béton ?

Deux des contraintes identifiées par l'équipe de conception ont joué un rôle prépondérant dans le rejet de l'option bois : le surcoût prévu associé à la mitigation incendie et l'usage de formaldéhydes dans la colle des membrures en lamellé-collé.

Pour l'équipe de la MDD, l'enjeu de la mitigation incendie s'est avéré assimilable à une discussion visant à départager deux options pour la réalisation d'un investissement environnemental de deux millions de dollars. L'exercice hypothétique, non appuyé sur des données quantitatives robustes, s'est donc résumé à comparer en termes qualitatifs le bénéfice environnemental ponctuel d'une structure en bois aux bénéfices récurrents et cumulatifs d'éventuelles interventions d'efficacité énergétique.

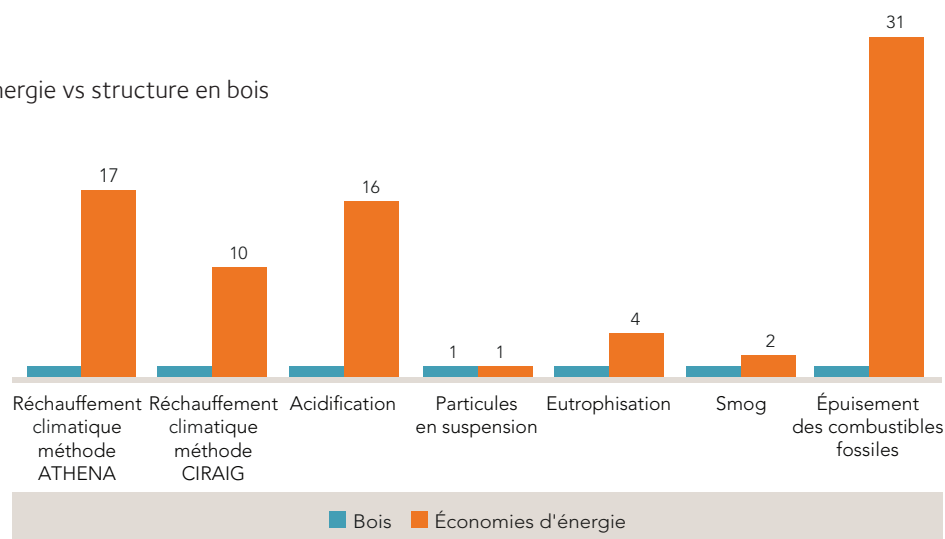
Le graphique ci-dessous présente côte à côte une estimation des impacts évités pour ces deux scénarios. D'un côté, la différence d'impacts entre la MDD telle que construite et la MDD avec une structure en bois similaire à celle du bâtiment Fondation (gains liés à la structure en bois) et de l'autre, la différence d'impacts générée par les économies d'énergie de la MDD, comparée au bâtiment référence (gains liés aux économies d'énergie). Le lien entre ces deux scénarios repose sur l'hypothèse que la mitigation incendie nécessaire pour la structure en bois coûte la même somme d'argent que l'ensemble des stratégies d'efficacité énergétique de la MDD. Or, si la valeur de 2 millions de dollars relative à un projet de mitigation incendie provient de l'opinion d'un expert, l'assignation d'une valeur équivalente à un hypothétique projet d'efficacité énergétique n'a pas de base empirique solide. À titre indicatif, une étude réalisée en 2012 pour le compte de la ville de Toronto a estimé les surcoûts associés à des ensembles de mesures d'efficacité énergétique pour immeubles de bureaux devant générer des économies d'énergie supérieures à 25 % comparé à un bâtiment référence [19]. Le plus coûteux des ensembles de mesures d'efficacité ainsi développés coûtait 7,35 \$ par pied carré brut construit. Appliqué à la superficie de la MDD, cet ensemble aurait donc coûté un demi-million de dollars, soit le quart des surcoûts associés à la mitigation incendie d'une structure en bois.

Le graphique ci-dessous semble démontrer les avantages environnementaux des approches comportant des bénéfices récurrents, tels que les stratégies d'efficacité énergétique, comparativement à celles de plus grande ampleur, mais à impact circonscrits dans le temps, comme la structure en bois.

GRAPHIQUE 8

Impacts évités

Ratio économies d'énergie vs structure en bois



Le deuxième enjeu majeur relatif à cette décision concernait le respect d'une exigence particulière de la certification LEED®. La version LEED® Canada-NC 1.0, en vigueur au moment de la conception du bâtiment en 2006, excluait catégoriquement le bois composite contenant de la résine d'urée formaldéhyde ajoutée. Or, en cours de conception, nos architectes ont affirmé à plusieurs reprises que les éléments structuraux en bois lamellé-collé disponibles au Québec à ce moment ne respectaient pas cette condition. Selon ce point de vue, l'intégration de tels matériaux dans le projet aurait impliqué l'abandon de nos objectifs de certification LEED®. Cette indisponibilité de lamellé-collé sans urée formaldéhyde ajoutée en 2006 au Québec a par la suite été réfutée dans le contexte d'un débat d'experts sur cette question par un journaliste spécialisé ayant communiqué directement avec des fournisseurs.

Nonobstant l'apparence imparable de ces deux arguments au moment de la conception de la MDD, le choix d'une structure en béton pour le projet relève d'un ensemble plus large de variables, parmi lesquelles nous retrouvons l'ajout de substances ignifuges dans l'environnement, la destruction massive d'écosystèmes forestiers, la vulnérabilité du bois à l'humidité, les enjeux de masse thermique (efficacité énergétique) et les conséquences défavorables associées à l'enveloppe surdimensionnée d'un bâtiment en bois. Cette décision, ouvertement contestée à l'époque par plusieurs acteurs du milieu de la construction, Équiterre ne l'a jamais regrettée.

L'efficacité énergétique : plus de matériaux et moins d'impacts

La MDD compte plusieurs équipements destinés à générer des économies d'énergie. Or, au moment présent, aucune machine ni aucun système mécanique ne peut être modélisé par l'*Impact Estimator*. Ainsi, s'il est possible d'intégrer aux analyses les gains d'impacts attribuables aux économies d'énergies qu'ils génèrent, il n'est pas encore possible d'estimer la part d'impacts attribuable aux matériaux qui les composent.

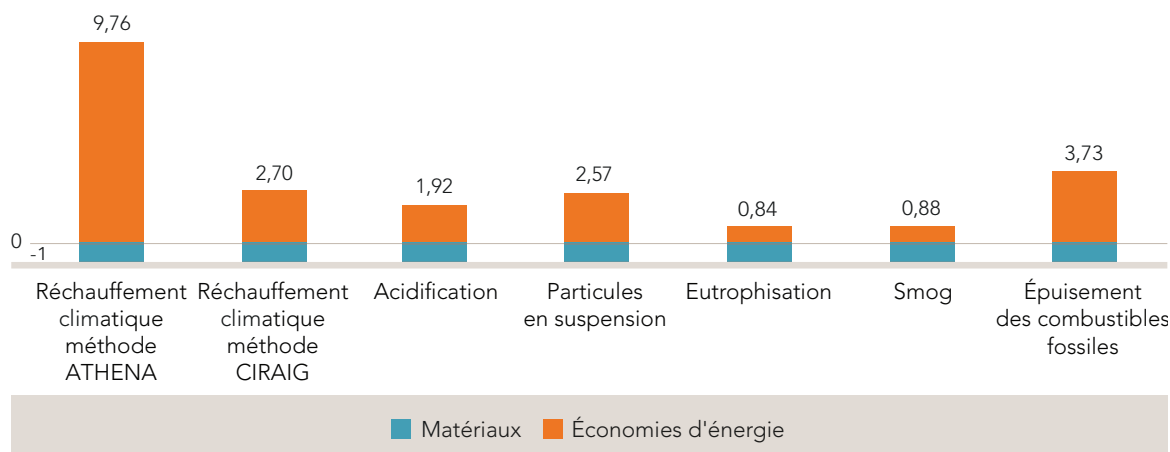
Trois stratégies utilisées dans la réalisation de la MDD et ayant un impact énergétique ont pu être modélisées avec l'*Impact Estimator* afin de déterminer les impacts de leur fabrication, installation, transport et fin de vie ; il s'agit de la toiture végétalisée, de l'isolation à l'uréthane giclé et de la fenestration à triple vitrage.

Dans les cas du verre triple et de l'uréthane giclé utilisés comme isolants excédentaires (non prescrit par le code du bâtiment), l'existence de données de simulation énergétique spécifiques permet d'évaluer les impacts attribuables aux économies énergétiques ayant justifié leur utilisation. Ces simulations énergétiques ont été réalisées par les ingénieurs concepteurs de la MDD avec le logiciel EE4. Il est généralement entendu qu'en ce qui concerne la résistance thermique des murs opaques, la MDD aurait satisfait aux exigences du Code modèle national de l'énergie pour les bâtiments (CMNEB), en vigueur au moment de sa construction, par la simple utilisation d'un matelas de six pouces d'isolant en fibre de verre. Pour les fins du présent rapport, la couche d'uréthane giclé de 40 mm appliquée sur l'ensemble des murs opaques du bâtiment est considérée comme de l'isolant supplémentaire assimilable à une stratégie d'efficacité énergétique discrétionnaire. L'*Impact Estimator* n'offrant pas l'uréthane giclé parmi les choix d'isolants modélisables, nous avons utilisé le polyisocyanurate comme option de remplacement.

Les graphiques 9, 10, 11 et 12 des pages suivantes indiquent, pour chaque catégorie d'impact, par quel facteur les gains environnementaux attribuables à l'utilisation d'une stratégie d'efficacité énergétique dépassent les impacts générés par leur fabrication et leur installation. Utilisant presque exclusivement l'électricité (et la géothermie) pour son chauffage, la MDD s'avère un bâtiment assez peu représentatif de ce qui est bâti, et même de ce qui se bâtit actuellement, au Québec. Pour explorer comment pourraient s'articuler de tels ratios pour des bâtiments plus conventionnels, les mêmes graphiques sont présentés, dans lesquels du gaz naturel a été substitué à l'électricité pour la production de la chaleur.

GRAPHIQUE 9

Triple vitrage et géothermie
Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux

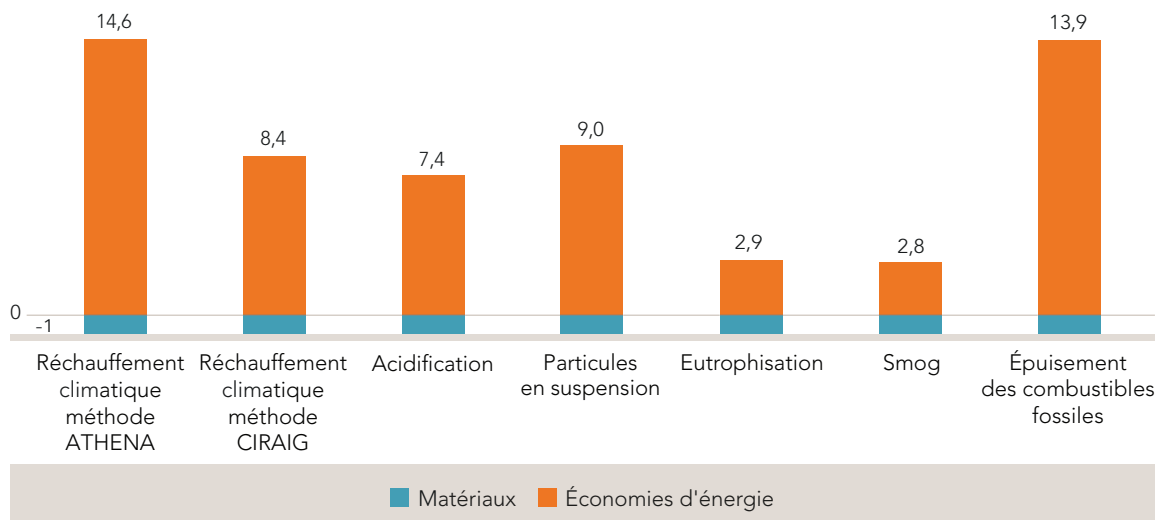


Parmi les points notables du graphique 9, l'importance du « retour sur l'investissement environnemental » pour la catégorie « Réchauffement climatique — méthode Athena » sort du lot. Or, comme l'indique le résultat immédiatement à sa droite, « Réchauffement climatique - méthode CIRAIG », basé sur les données d'émissions de GES spécifiques à l'électricité québécoise, une bonne part de ce ratio provient d'hypothèses injustifiées fondées sur les émissions mondiales moyennes des centrales hydroélectriques avec réservoir. Autre fait intéressant, sur l'ensemble de son cycle de vie, l'utilisation du triple vitrage semble entraîner légèrement plus d'eutrophisation et de smog qu'il ne permet d'en sauver. Finalement, entraînant des ratios assez fortement positifs pour quatre des six catégories d'impacts, le triple vitrage semble constituer un investissement environnemental pertinent.

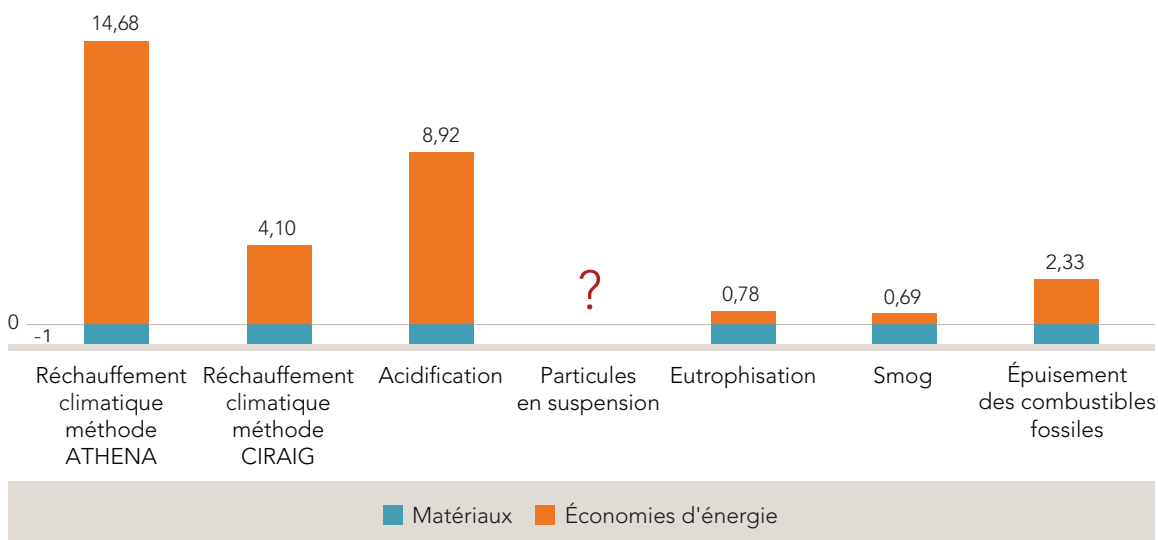
Le graphique ci-dessous, quant à lui, semble démontrer que si la MDD était chauffée au gaz naturel, comme la plupart des bâtiments d'aujourd'hui, le retour sur l'investissement environnemental pour le triple vitrage serait sensiblement plus élevé, faisant même passer l'eutrophisation et le smog du côté des impacts évités.

GRAPHIQUE 10

Triple vitrage et chauffage au gaz
Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux

**GRAPHIQUE 11**

Uréthane giclé et géothermie
Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux



Le retour sur l'investissement environnemental pour la catégorie « Réchauffement climatique - méthode Athena » se démarque à nouveau dans le graphique comparant les impacts « matériaux » et « efficacité énergétique » de l'uréthane giclé. Comme dans le cas du graphique traitant du triple vitrage (graphique 9), la colonne « Réchauffement climatique-méthode CIRAIG », basée sur les données d'émissions de GES spécifiques

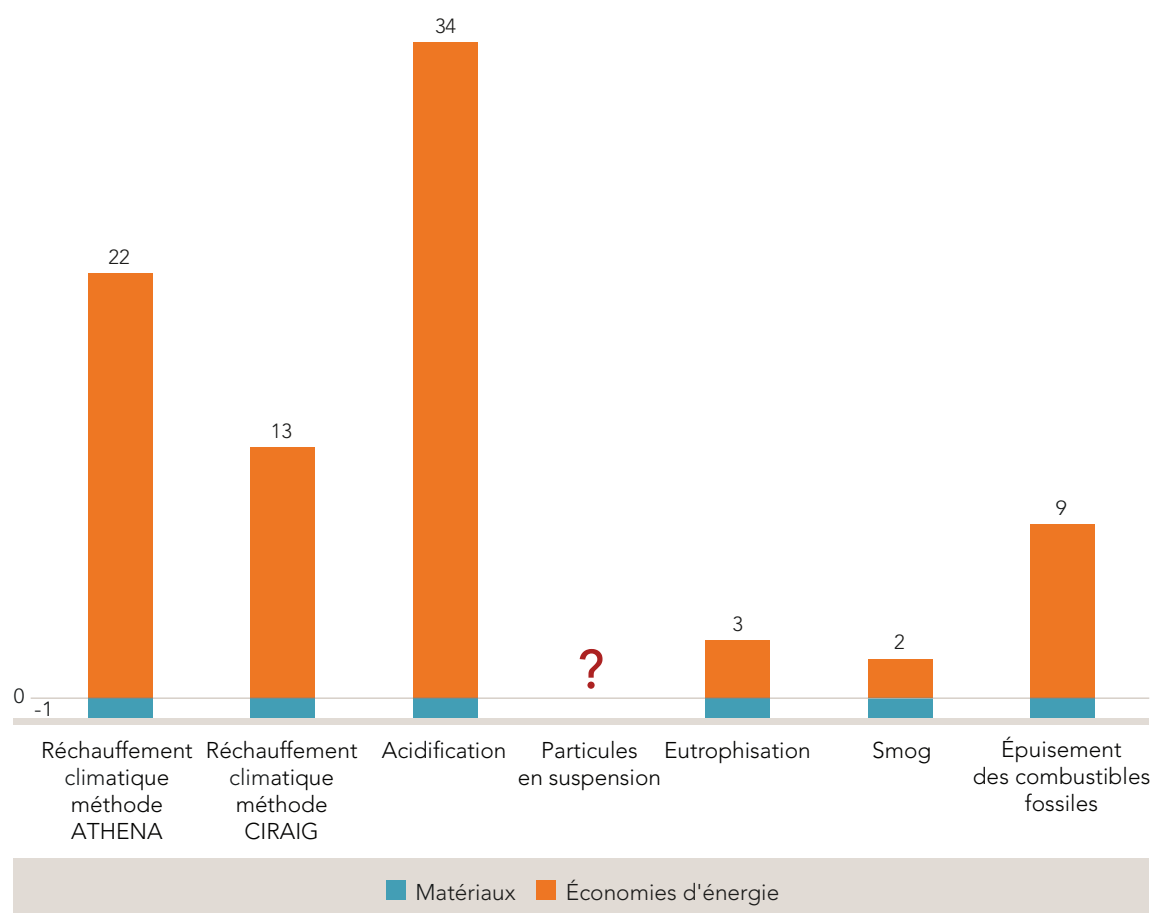
à l'électricité québécoise, indique qu'une bonne part de ce ratio provient d'hypothèses injustifiées fondées sur les émissions mondiales moyennes des centrales hydroélectriques avec réservoir. L'utilisation du triple vitrage semble elle aussi entraîner légèrement plus de smog et d'eutrophisation qu'il ne permet d'en sauver. Entraînant des ratios assez fortement positifs pour quatre des six catégories d'impacts, l'isolation supplémentaire à l'uréthane giclé constitue aussi un investissement environnemental pertinent.

Il n'a par ailleurs pas été possible de calculer un ratio pour la catégorie d'impact « particules en suspension » puisque les résultats générés par l'*Impact Estimator* démontraient une captation (dépollution) de particules fines au lieu d'émissions supplémentaires (pollution), et ce malgré l'utilisation d'une plus grande quantité de matériaux. Nous n'avons pas trouvé d'explication plausible à cette apparente aberration et l'Institut Athena, questionné sur le sujet, n'a pas non plus été en mesure de l'expliquer.

Si la MDD était chauffée au gaz naturel (graphique 12), comme la plupart des bâtiments d'aujourd'hui, le retour sur l'investissement environnemental pour l'isolant supplémentaire à l'uréthane giclé serait sensiblement plus élevé qu'avec l'approche géothermique en usage dans la MDD.

GRAPHIQUE 12

Uréthane giclé et chauffage au gaz
Ratio impacts énergétiques vs impacts matériaux



Les stratégies d'économie d'impacts spécifiques aux matériaux

La plupart des stratégies mises en place par la MDD pour diminuer ses impacts environnementaux grâce à une sélection plus judicieuse des matériaux se regroupent sous l'égide des crédits LEED®. Sous l'apparente simplicité d'une méthode unique, la sélection des matériaux est complexifiée par le fait que ceux-ci peuvent contribuer à plus d'un crédit à la fois (contenu recyclé, distance de transport, foresterie durable, vitesse de renouvellement de la ressource et émanations de composés organiques volatiles). Des considérations fonctionnelles et les préférences particulières des entrepreneurs jouent aussi un rôle dans le choix final des matériaux utilisés. L'ensemble de ces variables fait en sorte qu'il devient très difficile d'identifier avec précision les raisons ayant mené à la sélection d'un matériau, et donc, d'assimiler nos choix directement à des motivations environnementales. Ce qui est la nature même d'une stratégie environnementale. Par ailleurs, *l'Impact Estimator* ne permet généralement pas de comparer des matériaux sur la base de considérations environnementales spécifiques, telles que le contenu recyclé ou la distance séparant le lieu de fabrication du site d'installation. Incapables d'identifier des stratégies « matériaux » strictement environnementales, mais surtout dénués d'outils pour évaluer les impacts de leurs caractéristiques environnementales, nous avons dû nous résoudre à ne pas analyser spécifiquement les impacts d'une partie importante des matériaux qui composent la MDD. Ainsi, des éléments tels que le contenu recyclé de la laine de fibre de verre (70 %) et des blocs de béton (90 %), l'extraction locale des matières premières du béton (260 km), le bois certifié FSC des coffrages et des dizaines d'autres ne sont pas pris en compte dans ce rapport.

Les démarches exploratoires : réutilisation de matériaux

Les concepteurs de la MDD ont réalisé certaines démarches visant à inclure des matériaux usagés dans le projet. Outre l'utilisation de panneaux de conteneurs comme revêtement et des discussions avec Hydro-Québec sur l'utilisation de pylônes et de poteaux électriques, des membres de l'équipe ont visité trois bâtiments en démolition d'où ils ont prélevé des éléments réutilisables, tels que des cabinets d'incendie, des portes en bois, des cloisons de toilettes et un ensemble complet d'ancrages à bossoirs. Avec la permission d'Équiterre, Pomerleau a aussi récupéré d'un de ses projets des panneaux de gypse ayant servi à des cloisons temporaires. Toutefois, en fin de compte, diverses réticences émanant des professionnels relativement à l'intégration de ces matériaux au projet auront surpassé les avantages perçus de leur réutilisation pour l'ensemble de ceux-ci, sauf pour 26 socles de bossoir et les quatre bossoirs associés, lesquels provenaient de l'édifice Vidéo tron, démoli en 2010 à Montréal.

La récupération de ces équipements a évité l'émission de 4,7 t de gaz à effet de serre, soit 0,2 % de l'ensemble des GES émis par les matériaux du bâtiment. Elle aura par ailleurs coûté 2 796 \$ de plus que la valeur soumissionnée pour du matériel neuf équivalent.

ILLUSTRATION 10

Les bases de bossoirs avant (gauche) et après leur déménagement (droite)

**Les matériaux évités : recouvrement de colonnes et plafonds suspendus**

Les concepteurs de la MDD ont aussi cherché à diminuer l'impact environnemental du projet en évitant d'utiliser des matériaux jugés superflus. Dans le lot des stratégies de cet ordre, celles pouvant être évaluées par l'*Impact Estimator* sont l'évitement de revêtement des colonnes (panneau de gypse et colombages) et les plafonds suspendus.

ILLUSTRATION 11

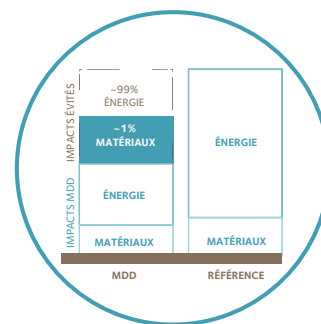
Absence de plafonds suspendus



L'impact spécifique de ces deux mesures est présenté ci-dessous en proportion de l'ensemble des gains environnementaux, par catégorie d'impacts attribuables aux matériaux. Aussi inclus au tableau, les impacts évités par l'utilisation d'ajouts cimentaires au-delà du 9 % de la moyenne canadienne [20], ainsi que les résultats d'une exploration hypothétique visant à déterminer les gains environnementaux pouvant résulter du remplacement de la brique par des panneaux de fibrociment, une solution généralement moins polluante. La perte de masse thermique associée à ce remplacement n'a pas été prise en compte dans notre analyse.

TABEAU 3

Contribution spécifique des stratégies réduisant les impacts liés aux matériaux



Contribution spécifique des stratégies réduisant les impacts liés aux matériaux

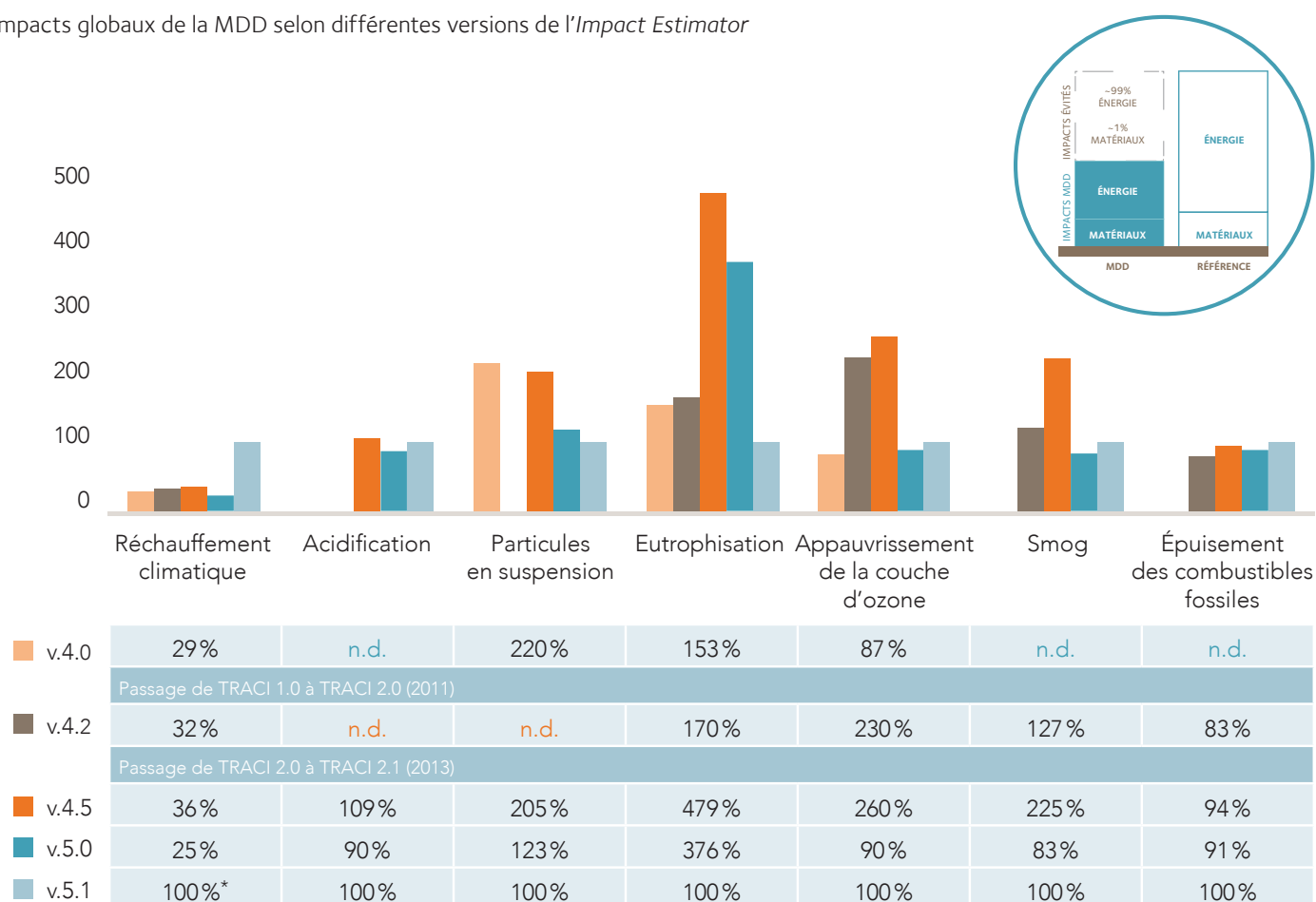
STRATÉGIES		Réchauffement climatique	Acidification	Particules en suspension
1	Remplacement d'une partie du ciment (25%) par des cendres volantes dans le béton	49 %	38 %	60 %
2	Non-recouvrement des colonnes (évitement de panneaux de gypse et des colombages) et absence de plafond suspendu	39 %	47 %	37 %
3	Réutilisation de bossoirs usagés	3 %	2 %	1 %
4	Remplacement de sections de briques par des panneaux de fibrociment	9 %	13 %	2 %

L'évolution de l'Impact Estimator

En raison de la disponibilité restreinte des ressources financières et humaines, la présente étude aura nécessité six ans d'efforts. Pendant cette période, tant l'*Impact Estimator* que les données d'inventaire et les méthodes d'évaluation des impacts ont évolué substantiellement. Le graphique de la page suivante indique l'évolution des résultats de notre étude en fonction des différentes versions du logiciel utilisées. La base de référence, 100 %, correspond aux données de la version de l'*Impact Estimator* utilisée pour produire le présent rapport.

GRAPHIQUE 13

Impacts globaux de la MDD selon différentes versions de l'*Impact Estimator*



* Nouvelles valeurs pour représenter les émissions de GES de l'électricité canadienne

Au moins trois types de mécanismes paraissent capables de provoquer des changements de résultats importants au passage d'une version à l'autre de l'*Impact Estimator* :

- L'évolution des inventaires du cycle de vie
- Les modifications apportées à la méthode d'évaluation des impacts TRACI [1] [7] [21] et
- L'évolution du logiciel lui-même, laquelle vise à éliminer des problèmes de fonctionnement et à ajouter des approches de construction modélisables.

L'avènement d'une nouvelle version de TRACI peut impliquer des changements dans les méthodes de calcul des impacts, mais également, dans certains cas, aller aussi loin qu'introduire des substitutions au niveau des indicateurs, les unités servant de mesure commune aux divers impacts formant une catégorie. Ainsi, pour le potentiel d'acidification, l'indicateur utilisé pour les versions 4.0 et 4.2 de TRACI était le « mole d'équivalent H⁺ », lequel a été remplacé par le « kg éq. SO₂ » pour les versions ultérieures. Pour cette catégorie d'impact, il n'existe donc aucune donnée en format « kg éq. SO₂ » pour les versions 4.0 et 4.2. En cours de réalisation du projet, des substitutions d'indicateurs se sont aussi produites pour les particules en suspension, le smog et les combustibles fossiles. Les particules en suspension étaient mesurées en « kg éq. PM_{2,5} » dans presque toutes les versions, sauf la 4.2, où le « kg éq. PM₁₀ » était en usage. Le smog, qui était quant à lui mesuré en « kg éq. NO_x » dans la version 4.0, est mesuré en « kg éq. O₃ » pour les suivantes. Après la version 4.0, l'épuisement des combustibles fossiles a momentanément remplacé l'énergie primaire à titre d'indicateur énergétique de l'*Impact Estimator*. L'indicateur d'énergie primaire était toutefois de retour dans la version 5.1.

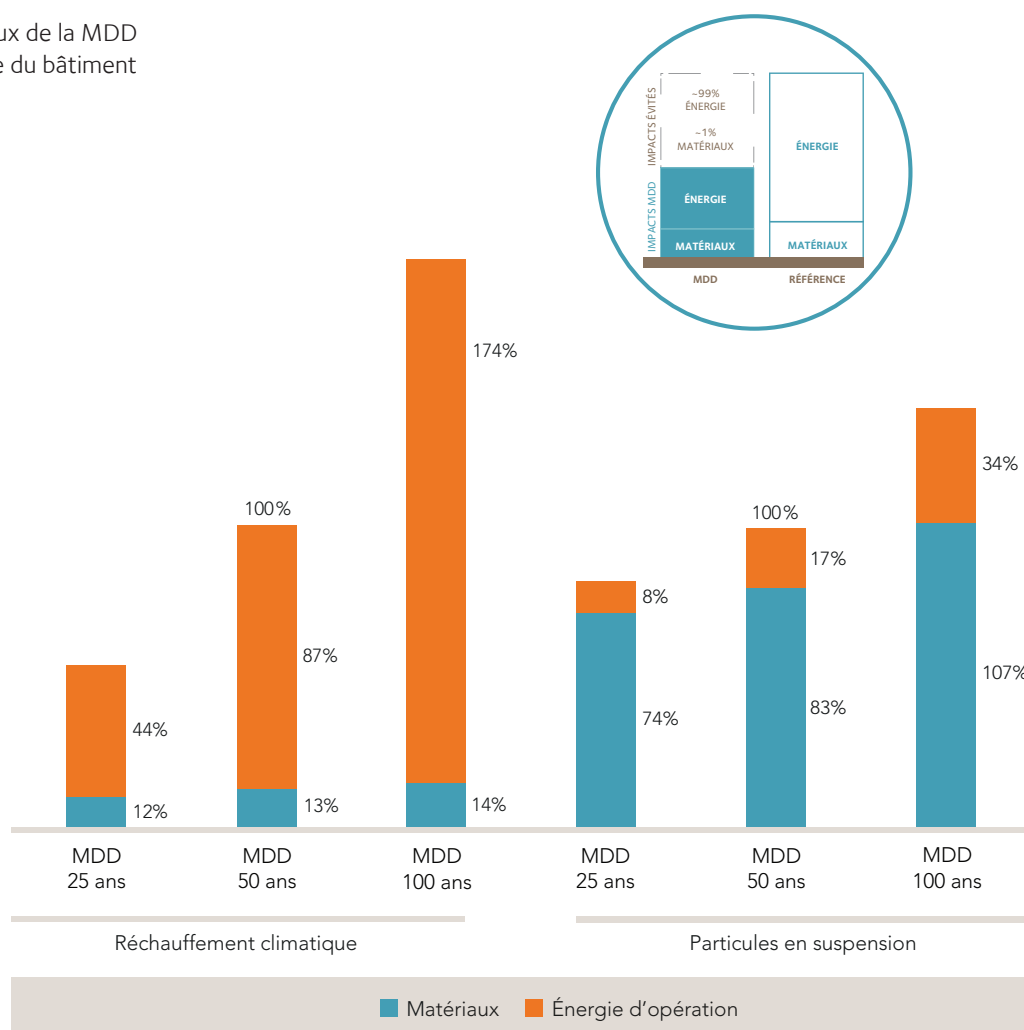
L'*Impact Estimator* ne dévoilant pas le détail de ses calculs, nous n'avons pas été en mesure d'identifier exactement la source d'importantes variations d'impacts apparues de concert avec certaines versions du logiciel. Nos communications avec l'Institut Athena ont néanmoins permis de faire ressortir une cause importante de changements : l'adoption de nouvelles valeurs d'émissions de GES pour l'hydroélectricité (basées sur la moyenne mondiale des centrales hydroélectriques à réservoir), une approche expliquée précédemment et ayant causé un saut de scores d'impacts important entre les versions 5.0 et 5.1.

L'analyse de sensibilité

L'*Impact Estimator* permet à l'utilisateur de sélectionner certaines options de paramètres impliquées dans le calcul des impacts sur le cycle de vie : la durée de vie du bâtiment, la ville où il est construit et le type de combustible utilisé pour son chauffage. L'exploration de l'effet de ces options sur les résultats pourrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement interne de l'outil. Par contre, l'intérêt pour des simulations supplémentaires avec le combustible utilisé (gaz naturel) ne nous a pas paru justifié, cette option étant explorée plus tôt dans ce rapport.

GRAPHIQUE 14

Impacts totaux de la MDD
Durées de vie du bâtiment



Une comparaison des résultats pour des durées de vie de 25, 50 ou 100 ans montre que les impacts totaux augmentent substantiellement en fonction des durées de vie, et ce, pour les deux catégories d'impacts considérées (réchauffement climatique et particules en suspension). Alors que les impacts attribuables à l'énergie d'opération augmentent proportionnellement à la durée de vie du bâtiment, ceux liés aux matériaux, pour l'indicateur de réchauffement climatique, grimpent légèrement plus rapidement avec les années (5 % entre les scénarios « 25 ans » et « 50 ans » et 12 % entre « 50 ans » et « 100 an »). Pour les particules en suspension, la différence entre « 25 ans » et « 50 ans » est de 13 % alors que celle séparant les options « 50 ans » et « 100 ans » est de 29 %. Cumulées sur 100 ans, ces hausses d'impacts n'excèdent jamais 42 % des impacts initiaux.

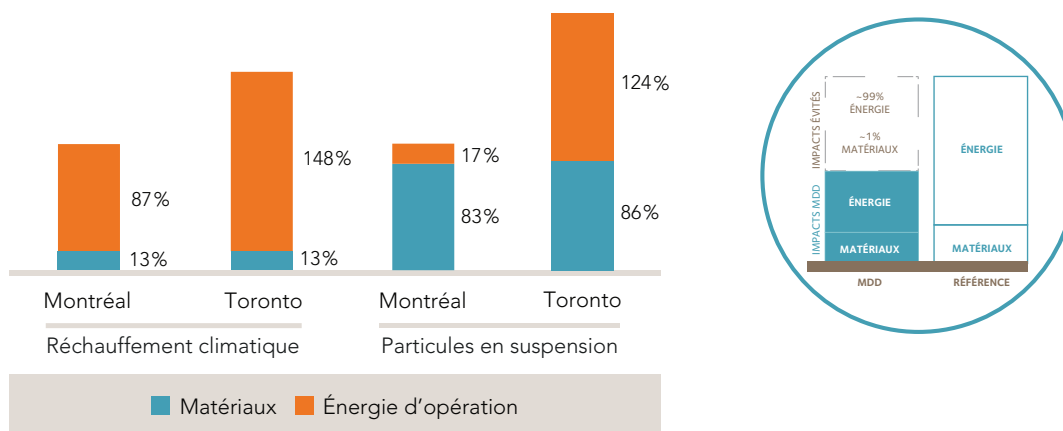
Ces résultats démontrent que l'outil, intégrant le principe de la désuétude et de la détérioration, ne remplace pas l'ensemble des matériaux d'un bâtiment et cela même sur une période de temps dépassant largement les meilleures durées de vie publiées par l'industrie. La part prépondérante du béton dans les impacts des matériaux d'un bâtiment (60 %) et le fait que ce béton est généralement protégé par l'enveloppe pourraient justifier que le logiciel ne remplace pas une part plus importante des matériaux originaux d'un édifice sur

un horizon de 100 ans. S'il semble logique de corrélérer la durée de vie estimée d'un bâtiment avec une augmentation de matériaux à remplacer, il apparaît surprenant que la hausse relative d'impacts entre 50 et 100 ans soit pratiquement la même que la hausse entre 25 et 50 ans. Selon notre analyse, cela serait dû au fait que l'*Impact Estimator* n'évalue que les matériaux d'enveloppe et de structure, lesquels ont souvent des durées de vie réelles au moins égales à l'horizon maximal (100 ans) des durées de vie estimées par le logiciel. Par ailleurs, plusieurs des matériaux mineurs d'enveloppe qui doivent être remplacés le sont, dans le logiciel, sur une base annualisée (par exemple, 3 % du verre des fenêtres par année) [22].

L'analyse de sensibilité du lieu d'implantation de la MDD (Montréal vs Toronto) montre que cette variable a un effet significatif sur les résultats obtenus pour les indicateurs considérés. On peut ainsi observer que la contribution des matériaux aux impacts totaux du bâtiment, pour un indicateur, est sensiblement la même entre Montréal et Toronto, alors que la contribution de l'énergie d'opération à ces mêmes impacts totaux est beaucoup plus importante pour Toronto. Cette fluctuation d'impact lié à l'énergie d'opération est expliquée par un portefeuille énergétique émettant plus de GES en Ontario qu'au Québec. Alors que le Québec produit la majeure partie de son électricité à partir de centrales hydroélectriques, environ 14,6 % de l'électricité produite en Ontario est fabriquée à partir du gaz naturel et 2,8 % à partir du charbon (l'*Impact Estimator* utilise l'année 2012 comme référence) [23].

GRAPHIQUE 15

Impacts totaux de la MDD
Lieux d'implantation



La comparaison des résultats avec ceux d'autres études

Le tableau suivant résume les résultats de 12 études recensées dans la littérature scientifique et jugées similaires à la nôtre en matière d'objet (immeubles de bureaux) et de méthode (analyse du cycle de vie). Un tableau comportant les références complètes et des notes méthodologiques est présenté en annexe.

L'intérêt de ce tableau, au-delà d'illustrer la relative rareté de telles études, consiste à démontrer que nos résultats sont dans la même échelle que celles de chercheurs de plusieurs pays ayant utilisé des méthodologies sans doute fort différentes (sauf pour l'autre étude canadienne, réalisée en partie avec *l'Impact Estimator*). Étant donné les marges d'erreur importantes caractérisant l'analyse du cycle de vie et la forte diversité dans la construction et l'usage des bâtiments, les écarts dans les résultats nous paraissent remarquablement minces, contribuant par le fait même à confirmer un certain niveau de qualité pour nos résultats.

TABEAU 4

Recensement des résultats d'études similaires

					RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE		ÉNERGIE PRIMAIRE	
	Année	Superficie m ²	Durée de vie ans	Pays	Matériaux T. éq. CO ₂ /m ²	Opération T. éq. CO ₂ /m ²	Matériaux GJ/m ²	Opération GJ/m ²
	2017 *	6 348	50	Canada (MDD)	0,3	2,3	4,2	49
					0,3	0,6	4,2	49
[24]	1998**	4 315	40	Japon	0,9	3,5	10,5	49
[25]	2003	7 300	75	États-Unis	0,6	17,8	7,6	308
[26]	2003	15 600	50	Finlande	0,5	2,6	N.D.	30
[27]	2006	4 400	50	Finlande	0,5	2,5	6,8	46
				États-Unis	0,9	5,0	14,0	68
[28]	2008	60 000	50	Thaïlande	0,5	0,5	N.D.	N.D.
[29]	2011***	47 454	60	États-Unis	0,2	4,7	N.D.	N.D.
				États-Unis	0,2	3,5	N.D.	N.D.
[30]	2011	36 500	50	Chine	3,0	13,0	9,6	59
[31]	2013	3 353	50	Italie	0,6	2,7	7,4	42
[32]	2013	37 000	75	États-Unis	0,2	N.D.	5,1	294
[18]	2015****	5 400	50	Canada	0,3	0,1	N.D.	N.D.
					0,3	0,3	N.D.	N.D.
[33]	2016	16 873	50	Chine	0,7	4,3	N.D.	19
Moyennes					0,6	4,2	7,7	92,2

* Présente étude – MDD : La ligne supérieure indique les résultats selon la méthode Athena (GES) et la ligne inférieure, les résultats selon la méthode CIRAIG

** Moyenne de 10 bâtiments

*** La ligne supérieure présente les résultats d'un bâtiment situé à Chicago et la ligne inférieure, un bâtiment situé à Phoenix

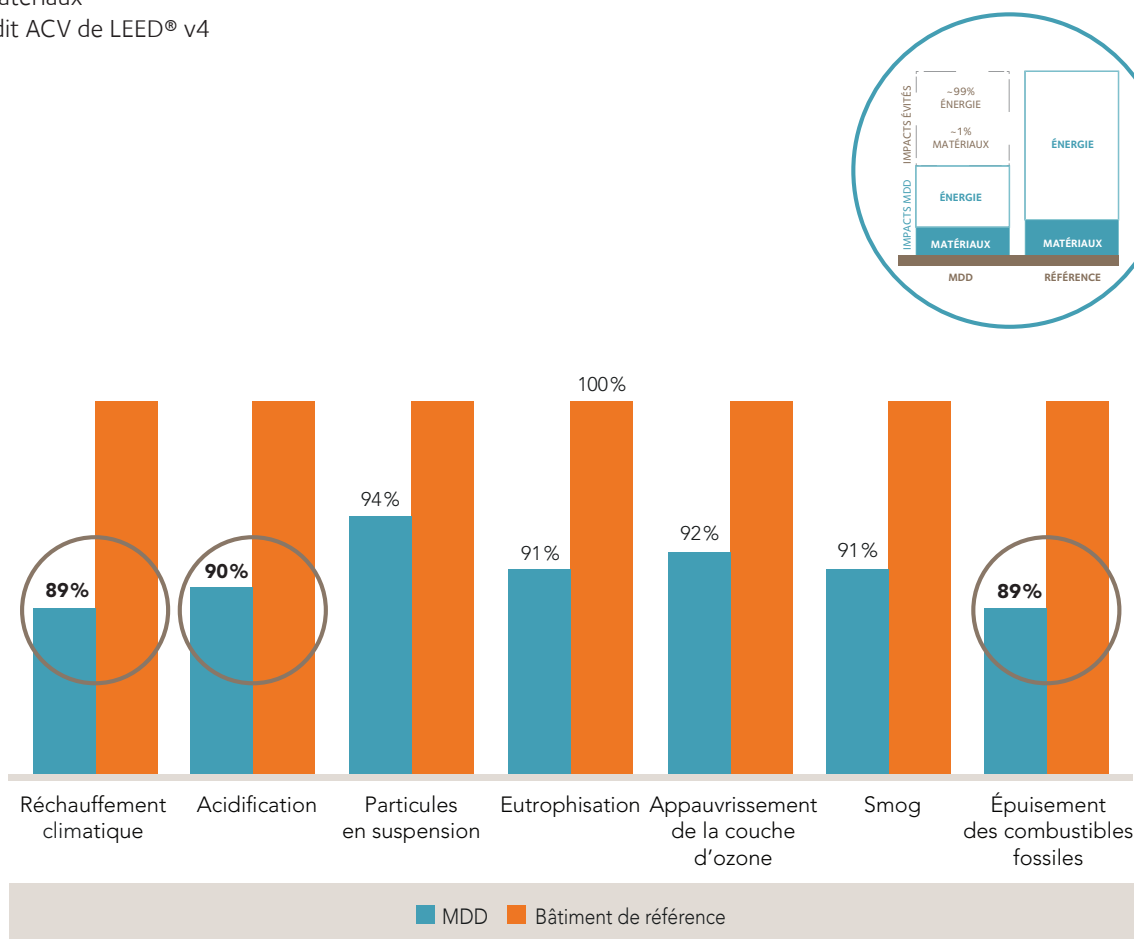
**** La ligne supérieure se rapporte aux résultats d'un bâtiment modélisé par système constructif dans Athena (même méthode que celle utilisée dans ce rapport) et la ligne inférieure, aux résultats obtenus avec SimaPro et ecoinvent v.2.2.

La MDD aurait-elle obtenu le crédit ACV de LEED® V4 ?

Nos résultats d'analyse ont été utilisés pour déterminer si notre bâtiment se serait qualifié pour l'option 4 (*Whole-Building Life-Cycle Assessment*) du crédit MR — *Building Life-Cycle Impact Reduction* de LEED® v4, lequel n'existait pas dans la version de LEED® (NC 1.0) visée et obtenue par la MDD. Pour se qualifier, la MDD devait obtenir des résultats inférieurs de 10 % à ceux d'un bâtiment référence pour trois catégories d'impacts, dont le réchauffement climatique [34]. Le champ d'études couvrait les matériaux d'enveloppe, la structure, les murs non porteurs et les plafonds. Toutefois, il est à noter que les matériaux participant à une meilleure efficacité énergétique par rapport au bâtiment de référence (p. ex. triple vitrage) ne sont pas considérés dans cette analyse, car ceux-ci sont jugés globalement favorables à l'environnement (voir section «L'efficacité énergétique : plus de matériaux, moins d'impacts»). Ainsi, la comparaison des résultats d'impacts de la MDD et du bâtiment référence, sur la base des quatre stratégies matériaux énumérées au tableau 3 (p. 40 du présent rapport), indique qu'une réduction de 10 % a effectivement été obtenue pour les catégories réchauffement climatique, acidification et épuisement des combustibles fossiles.

GRAPHIQUE 16

Impact des matériaux
Étude du Crédit ACV de LEED® v4



Pour la réalisation de ce crédit, LEED® exige une analyse du cycle de vie basée sur une durée de vie de 60 ans, alors que notre étude repose sur une durée de 50 ans. Les conséquences de cette différence d'hypothèses, si elles existent, favorables à la MDD dans le cas des matériaux non utilisés (recouvrement colonne et plafond), sont neutres dans le cas des cendres volantes et des bases de bossoirs réutilisées, et seraient défavorables à la MDD dans le cas du remplacement des sections de briques par des panneaux de fibrociment. Comme les stratégies d'évitement de matériaux génèrent plus d'économies d'impacts que la substitution de matériaux de revêtement, nous estimons que l'utilisation d'une période de 50 ans au lieu de 60 est défavorable à la MDD pour ce calcul et confirme en conséquence son éligibilité pour l'obtention de ce crédit.



« En termes normalisés, la MDD s'avère 3,27 fois moins polluante que le bâtiment référence. »

CONCLUSION

Le présent rapport invite à deux séries de conclusions : la première portant sur les résultats d'analyse du cycle de vie de la MDD et la deuxième sur la qualité des données générées par l'*Impact Estimator*.

La Maison du développement durable génère moins d'émissions néfastes que le bâtiment référence pour six des sept catégories d'impacts évalués; une conclusion somme toute peu surprenante pour un bâtiment écologique conçu spécifiquement à cette fin. Dans le seul registre des émissions de GES, 9 434 tonnes éq. de CO₂ seraient épargnées grâce aux attributs écologiques du bâtiment. En termes normalisés, la MDD s'avère 3,27 fois moins polluante que le bâtiment référence. Une large part de cette différence est attribuable aux économies d'énergie, qui remplacent une quantité significative du gaz naturel utilisé pour « chauffer » le bâtiment référence. Pourtant, les particules en suspension et le smog sont plus fortement influencés par la phase de fabrication des matériaux que par celle de l'utilisation (efficacité énergétique). Puisque différentes approches de conception de bâtiments durables entraînent différents impacts environnementaux, des choix peuvent être faits pour favoriser les enjeux prioritaires d'une région ou d'une époque. Ces considérations pourraient, par exemple, s'avérer utiles pour des pays en développement souhaitant investir leurs rares ressources dans des enjeux aux incidences plus locales, comme le smog ou l'eutrophisation, que dans des enjeux globaux comme les changements climatiques. Elles pourraient aussi être d'intérêt pour les porteurs d'enjeux spécifiques comme la Fondation One Drop (eutrophisation), l'Association québécoise de lutte contre la pollution atmosphérique (particules fines) et pour Canards Illimités Canada (acidification), de même qu'à des « généralistes », pour équilibrer leurs investissements environnementaux.

L'évaluation de stratégies de construction spécifiques, sans permettre de conclusions généralisables, permet d'améliorer notre compréhension de certaines propositions environnementales offertes aux constructeurs. En ce sens, l'étude des matériaux

d'enveloppe de la MDD fait ressortir le risque des stéréotypes en matière de bâtiment durable, alors qu'un produit considéré comme local par LEED® s'avère moins performant que son équivalent européen, une constatation témoignant probablement de l'incidence environnementale prépondérante des procédés de fabrication, qu'ils soient modernes, ingénieux, disciplinés ou par nature peu polluants. Les fiches de déclaration environnementale des différents produits de construction permettront de valoriser cette partie importante du cycle de vie des matériaux. Un second résultat d'intérêt issu de notre analyse porte sur les impacts environnementaux des murs rideaux, qui performant moins bien que les autres options de revêtement, et ce même sans tenir compte des pertes énergétiques attribuables à leur faible résistance thermique. Cette constatation s'ajoute aux voix nombreuses contestant la pertinence de l'utilisation massive de cette stratégie ayant la faveur d'un très grand nombre de bâtisseurs modernes.

Le bas coût et le faible impact environnemental de notre approvisionnement électrique amoindrissent la rentabilité globale des stratégies d'efficacité énergétique mises en place dans les bâtiments québécois. Nous avons jugé intéressant d'étudier cette question dans la présente étude, en comparant l'investissement environnemental (la pollution) requis par la mise en place de deux stratégies d'efficacité énergétique appliquées pour la conception de la MDD, avec les bénéfices issus de leur utilisation. Ces approches (le triple-vitrage et l'application d'uréthane giclé), après analyse, ne sont pas rentables pour l'ensemble des impacts environnementaux, puisque leur mise en place émet plus de smog et de particules fines que leur utilisation n'en épargne. Toutefois, les gains relatifs aux impacts liés au réchauffement climatique et à l'acidification, de plus grande ampleur, démontrent qu'elles constituent des investissements environnementaux justifiables.

La question de la structure de la MDD, enchâssée dans l'enjeu plus large de la pertinence d'utiliser le bois pour soutenir des édifices en hauteur, a ensuite été évaluée en détail. Comme prévu, strictement sur le plan des matériaux, l'approche d'une structure en

bois génère beaucoup moins d'impacts que celle en béton et cela même lorsqu'on tient compte des ajouts cimentaires et des volumes de bois supérieurs à ceux comptabilisés par l'*Impact Estimator*. La conception de la MDD ayant fait ressortir la notion de coût de renoncement associée au choix d'une structure en bois, obligatoirement accompagné d'une dispendieuse stratégie de mitigation incendie, nous avons souhaité explorer les conséquences de cet enjeu du point de vue des impacts environnementaux. Notre comparaison des économies d'impacts attribuables à une structure en bois avec celles potentiellement générées par un important chantier d'efficacité énergétique tel que celui mis en œuvre à la MDD démontre clairement les avantages environnementaux d'un investissement dans l'efficacité énergétique, et ce, pour l'ensemble des catégories d'impacts évaluées. Cette démonstration met en perspective les avantages relatifs d'un choix de conception spectaculaire, mais aux effets ponctuels, versus une stratégie d'apparence plus conservatrice, mais aux effets à très long terme. Elle explore aussi l'enjeu fondamental des coûts d'opportunité dans les processus décisionnels en construction durable.

Nous sommes d'avis que les travaux présentés ici ont fait ressortir des faits insoupçonnés s'éloignant des présomptions habituelles du milieu du bâtiment durable. Un tel constat semble confirmer la pertinence de l'analyse du cycle de vie et des outils servant à la rendre utilisable dans les processus de conception de bâtiment.

La complexité des bâtiments modernes et des enjeux environnementaux qui y sont associés rend particulièrement ardue l'application des principes du développement durable au secteur de la construction. Les outils comme l'*Impact Estimator* visent à faciliter ces processus en simplifiant la réalisation d'analyses du cycle de vie et en ce sens, ils s'inscrivent en incontournable de la réalisation des bâtiments du futur. Néanmoins, si l'*Impact Estimator* répond à un

besoin fondamental, il n'en demeure pas moins un outil aux capacités limitées dont les données doivent être envisagées avec prudence. Deux facteurs principaux restreignent la portée des données générées par cet outil : 1) l'exclusion des matériaux de finition et des équipements électromécaniques des éléments pris en charge par le logiciel et 2) le nombre relativement limité des types d'assemblages disponibles pour évaluation. En découlent des données qui ne couvrent jamais l'ensemble des impacts potentiels d'un bâtiment.

Outre cette limite de l'*Impact Estimator*, des facteurs internes et externes influencent la nature même des résultats générés. C'est le cas des hypothèses des utilisateurs, des changements aux règles de calcul des impacts (TRACI), de l'évolution d'éléments méthodologiques relatifs aux inventaires du cycle de vie et des erreurs de fonctionnement du programme.

Les choix méthodologiques des utilisateurs de l'*Impact Estimator* peuvent engendrer des différences d'impacts importantes dans les résultats. Étant donné la grande variabilité dans la consommation de gaz naturel de la MDD lors de ses quatre premières années, le choix des années de référence pour la modélisation des données s'avère avoir des conséquences significatives sur les résultats finaux. Dans le contexte où la consommation de gaz du bâtiment au cours de ses trois premières années puisse être considérée comme une anomalie — une hypothèse qui semble confirmée par la consommation très basse et régulière des années quatre et cinq — ce choix n'est pas si simple. Ainsi, l'utilisation des deux dernières années comme référence, au lieu des trois dernières années sur lesquelles s'appuie notre modélisation de base, entraîne une réduction d'impacts de 15 % au niveau du réchauffement climatique.

« La complexité des bâtiments modernes et des enjeux environnementaux qui y sont associés rend particulièrement ardue l'application des principes du développement durable au secteur de la construction. »

L'enjeu des charges aux prises en est également un d'intérêt, alors que celles-ci sont généralement exclues des travaux de simulation énergétiques utilisés pour modéliser les bâtiments non construits et de nombreuses études et publications. Par ailleurs, il s'avère difficile de les exclure des données de consommation énergétique des bâtiments existants. Intéressés par cette question, nous avons estimé les charges aux prises de la MDD afin de déterminer leur contribution aux impacts totaux du bâtiment. Ainsi, l'exclusion de 30 % de la consommation électrique de la MDD qui leur est reliée entraîne une réduction d'impacts pour le réchauffement climatique de 23 %.

Les changements radicaux d'unités de mesure dans TRACI font en sorte qu'un indicateur peut disparaître complètement d'une version à l'autre de l'*Impact Estimator*, influant sur le niveau de confiance des utilisateurs et la fiabilité des résultats d'ACV qui en sont issus. D'autre part, l'évolution des méthodes de calcul de TRACI pourrait entraîner d'importants changements dans les résultats des ACV, comme en témoignent les sauts de valeurs entre les versions 2.0 et 2.1 pour les catégories « eutrophisation » et « smog » et entre les versions 1.0 et 2.0 pour la catégorie « appauvrissement de la couche d'ozone ». Notons toutefois que d'autres sauts de valeurs relevés dans nos analyses ne peuvent pas être attribuables aux changements de versions de TRACI et demeurent pour le moment inexpliqués.

Certains choix méthodologiques relatifs aux inventaires du cycle de vie utilisés par l'*Impact Estimator* peuvent aussi entraîner des effets sur les résultats. Un cas de ce type est apparu dans nos recherches quant au choix des données d'inventaire censées représenter les émissions de gaz à effet de serre de l'hydroélectricité canadienne. Nos recherches ont statué que les valeurs utilisées par l'Institut Athena sont 9 fois plus importantes que celles calculées spécifiquement pour l'hydroélectricité d'Hydro-Québec par le CIRAIQ. En termes pratiques, ce choix méthodologique implique que les résultats de l'*Impact Estimator* pour des projets québécois sont nettement et systématiquement surévalués par rapport à la réalité.

Un autre exemple de choix méthodologique ayant une incidence sur les résultats est relatif à la quantité de bois incluse dans un bâtiment en hauteur à structure de bois. Une comparaison de la quantité de bois intégrée à la modélisation d'une MDD en bois générée automatiquement par l'*Impact Estimator* à la quantité réelle de bois utilisée dans un bâtiment existant de Québec montre que ce dernier en utilise presque deux fois plus par unité de surface construite. Une différence sur le plan de la quantité de matériaux qui entraînera certainement un impact sur les résultats.

Alors que l'exemple précédent est dû à un choix de conception (du logiciel), en certaines occasions, c'est le logiciel lui-même qui semble faire défaut et générer des résultats soulevant des doutes. Un exemple probant de ce type d'enjeu est apparu lors de l'analyse des résultats du graphique 8, alors que l'*Impact Estimator* calculait que l'application de polyisocyanurate générerait des impacts positifs, dont une réduction des particules en suspension, non attribuables à sa fonction d'isolant thermique.

Notre usage intensif et vigilant de l'*Impact Estimator*, de même que nos travaux de vérification des résultats via des sources tierces ont fait ressortir des enjeux de validité concernant les résultats générés. Nous souhaitons ainsi sensibiliser toute équipe se lançant dans l'aventure de la construction d'un bâtiment durable à l'importance d'user d'une grande prudence lors de l'interprétation des résultats quant aux impacts des matériaux et à la nécessité de confier à des ressources compétentes les enjeux complexes de l'analyse du cycle de vie.

RÉFÉRENCES

Les données primaires des analyses sont disponibles ici : www.equiterre.org/donneesacvmdd2017

- [1] Bare J. TRACI 2.0: The tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. *Clean Technol Environ Policy* 2011;13:687–96. doi:10.1007/s10098-010-0338-9.
- [2] Athena Sustainable Materials Institute. *Athena Impact Estimator for Buildings*. <http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator>; 2017. Consulté le 5 avril 2017.
- [3] U.S. Energy Information Administration. Florida – State Profile and Energy Estimates – Profile overview, 2014. <https://www.eia.gov/state/?sid=FL>; 2016. Consulté le 3 avril 2017.
- [4] Tirado-Seco P. *Comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique*, CIRAIG – Polytechnique Montréal, <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/centre-documentation/pdf/comparaison-filieres-et-bouquets.pdf>; 2014:1–102. Consulté le 12 mars 2017.
- [5] Hertwich EG. *Addressing biogenic greenhouse gas emissions from hydropower in LCA*. *Environ Sci Technol* 2013;47:9604–11. doi:10.1021/es401820p.
- [6] Teodoru CR, Bastien J, Bonneville MC, Del Giorgio PA, Demarty M, Garneau M, et al. *The net carbon footprint of a newly created boreal hydroelectric reservoir*. *Global Biogeochem Cycles* 2012;26:1–14. doi:10.1029/2011GB004187.
- [7] Bare J, Norris GA, Pennington DW. *TRACI – The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*. *J Ind Ecol* 2003;6:49–78. doi:10.1162/108819802766269539.
- [8] Ryberg M, Vieira MDM, Zgola M, Bare J, Rosenbaum RK. *Updated US and Canadian normalization factors for TRACI 2.1*. *Clean Technol Environ Policy* 2014;16:329–39. doi:10.1007/s10098-013-0629-z.
- [9] Athena Sustainable Materials Institute. *Communication personnelle* 2016.
- [10] WebTechTix. *Design, Construction & Structural Details of Burj al Khalifa*, *Civil Engineering Portal*. www.aboutcivil.org/burj-khalifa-design-construction-structural-details.html; 2014. Consulté le 5 avril 2017.
- [11] FAQDD. *Calculateur GES*. Fonds d'action québécois pour le développement durable. http://www.faqdd.qc.ca/public/Calculateur_GES_FAQDD_version2013.xls; 2013. Consulté le 4 avril 2017.
- [12] Athena Sustainable Materials Institute. *A Life Cycle Analysis of Cladding Systems: Shaw Clay Brick and Rieder fibreC Cladding Systems*, Contract Research Report, Ottawa, Ontario. 2009.
- [13] Venta GJ. *Life cycle analysis of brick and mortar products*. The Athena Sustainable Materials Institute. http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2011/10/11_Brick_And_Mortar_Products.pdf; 1998. Consulté le 1^{er} avril 2017.
- [14] Athena Sustainable Materials Institute. *Database details. Impact Estimator for Buildings v4.5.0102*. https://www.calculatelca.com/wp-content/uploads/2012/10/LCI_Databases_Products.pdf; 2013. Consulté le 4 avril 2017.
- [15] CertainTeed-Saint-Gobain. *EPD Transparency Summary – Type X Gypsum board – Carrollton (KY), Moundsville (WV) et Roxboro (NC)*. https://www.certainteed.com/resources/CTG_TransparencyBrief_Type_X_Carrollton_Moundsville_Roxboro.pdf; 2015. Consulté le 3 avril 2017.
- [16] CertainTeed-Saint-Gobain. *EPD Transparency Summary – Type X Gypsum board – Toronto*. https://www.certainteed.com/resources/CTG_TransparencyBrief_Type_X_Toronto.pdf; 2015. Consulté le 2 avril 2017.
- [17] CertainTeed-Saint-Gobain. *EPD Transparency Summary – Type X Gypsum board – Seattle-Vancouver*. https://www.certainteed.com/resources/CTG_TransparencyBrief_Type_X_Seattle_Vancouver.pdf; 2015. Consulté le 10 avril 2017.
- [18] Alain S. *Évaluation d'outils d'analyse du cycle de vie pour étudier la performance environnementale de bâtiments en bois innovants*, Mémoire. Université Laval. <http://www.theses.ulaval.ca/2015/31666/31666.pdf>; 2015. Consulté le 10 avril 2017.

- [19] Bach B, Lamb M, Earle J. *Cost/Benefit Analysis of Proposed Energy Efficiency Requirements for the Toronto Green Standard: Final Report*. <http://www.towerwise.ca/wp-content/uploads/2013/07/TGS-Phase-II-Cost-Benefit-Analysis.pdf>; 2012. Consulté le 2 mars 2017.
- [20] Athena Sustainable Materials Institute. *User Manual and Transparency Document – Impact Estimator for Buildings v.5*, https://calculatelca.com/wp-content/uploads/2014/10/IE4B_v5_User_Guide_September_2014.pdf; 2014:1–50. Consulté le 15 mars 2017.
- [21] Bare J, Young D. Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts (TRACI), TRACI version 2.1, User's Guide. <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HN53.pdf> 2012; 2012. Consulté le 5 avril 2017.
- [22] Morrison Hershfield Limited. Maintenance, Repair and Replacement Effects for Building Envelope Materials. http://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2011/10/2_Maintenance_Repair_And_Replacement.pdf; 2002. Consulté le 4 avril 2017.
- [23] Independent Electricity System Operator (IESO). *Media. Ontario's Independent Electricity System Operator Releases 2012 Electricity Production, Consumption and Price Data*. www.ieso.ca/corporate-ieso/media/year-end-data/2012; 2017. Consulté le 5 avril 2017.
- [24] Suzuki M, Oka T. *Estimation of life cycle energy consumption and CO2 emission of office buildings in Japan*. *Energy Build* 1998;28:33–41. doi:10.1016/S0378-7788(98)00010-3.
- [25] Scheuer C, Keoleian GA, Reppe P. *Life cycle energy and environmental performance of a new university building: Modeling challenges and design implications*. *Energy Build* 2003;35:1049–64. doi:10.1016/S0378-7788(03)00066-5.
- [26] Junnila S, Horvath A. *Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building*. *J Infrastruct Syst* 2003;9:157–66. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2003)9:4(157).
- [27] Junnila S, Horvath A, Guggemos AA. *Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States*. *J Infrastruct Syst* 2006;12:10–7. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:1(10).
- [28] Kofoworola OF, Gheewala SH. *Environmental life cycle assessment of a commercial office building in Thailand*. *Int J Life Cycle Assess* 2008;13:498–511. doi:10.1007/s11367-008-0012-1.
- [29] Ochsendorf J, Norford LK, Brown D, Durschlag H, Hsu SL, Love A, et al. *Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle*. Research Report R11-01 Concrete and Sustainability Hub, Massachusetts Institute of Technology, <https://cshub.mit.edu/sites/default/files/documents/MIT%20Buildings%20LCA%20Report.pdf>; 2011:1–119. Consulté le 14 janvier 2017.
- [30] Wu HJ, Yuan ZW, Zhang L, Bi J. *Life cycle energy consumption and CO2 emission of an office building in China*. *Int J Life Cycle Assess* 2012;17:105–18. doi:10.1007/s11367-011-0342-2.
- [31] Asdrubali F, Baldassarri C, Fthenakis V. *Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings*. *Energy Build* 2013;64. doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.018.
- [32] Collinge WO, Landis AE, Jones AK, Schaefer LA, Bilec MM. *Dynamic life cycle assessment: Framework and application to an institutional building*. *Int J Life Cycle Assess* 2013;18:538–52. doi:10.1007/s11367-012-0528-2.
- [33] Peng C. *Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling*. *J Clean Prod* 2016;112:453–65. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.078.
- [34] US Green Building Council. *LEED v4 for BD+C: Building life-cycle impact reduction*, <http://www.usgbc.org/credits/healthcare/v4-draft/mrc1>; 2017. Consulté le 1^{er} avril 2017.

