

CONCEPTION DES BÂTIMENTS POUR LA DÉMONTABILITÉ (CPD/A) ET L'ADAPTABILITÉ DÉVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES SUR LES MATÉRIAUX À FAIBLE EMPREINTE CARBONE

PARTENAIRE FINANCIER Québec 

Dieudonné Romaric Batsy, Ph. D.
Camille Laflamme, Stagiaire
Patrick Lavoie, MBA, M.A.

31 mars 2020
PROJET N° 301013611

REMERCIEMENTS

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

Québec 

CONCEPTION DES BÂTIMENTS POUR LA DÉMONTABILITÉ
(CPD/A) ET L'ADAPTABILITÉ - DÉVELOPPEMENT DES
CONNAISSANCES SUR LES MATÉRIAUX À FAIBLE
EMPREINTE CARBONE

PROJET N° 301013611

APPROBATEUR

Vincent Blanchard
Gestionnaire
Affaires réglementaires
vincent.blanchard@fpinnovations.ca

RÉVISEURS INTERNES

Aline Cobut, Chercheure

AUTEURS

Dieudonné Batsy et Patrick Lavoie
Chercheurs
Développement durable
(418) 659-2647

Avertissement

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

Suivez-nous   

TABLE DES MATIÈRES

ABBRÉVIATIONS.....	V
SOMMAIRE	VI
1. INTRODUCTION	1
2. CONCEPTION POUR LA DÉMONTABILITÉ ET L'ADAPTABILITÉ (CPD/A).....	1
3. ÉQUIPE DE PROJET	3
4. DÉFINITION DES SCÉNARIOS	4
4.1 Description sommaire du bâtiment tel que construit.....	4
4.2 Scénario de référence : Bâtiment PAL6 de classe sismique C.....	5
4.3 Scénario adaptabilité (Sc1).....	5
4.4 Scénario démontabilité axé sur la préfabrication (Sc2)	6
4.5 Scénario démontabilité axé sur les matériaux (Sc3)	6
5. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV).....	7
5.1 Objectifs et champ d'étude	7
5.1.1 Objectifs	7
5.1.2 But de l'étude	8
5.1.3 Auditoire visé	8
5.1.4 Applications prévues et portée de l'étude.....	8
5.2 Champ de l'étude	8
5.2.1 Description technique des systèmes.....	8
5.2.1.1 Scénario de référence (ScRef).....	8
5.2.1.2 Scénario adaptabilité (Sc1)	9
5.2.1.3 Scénario préfabrication (Sc2).....	11
5.2.1.4 Scénario matériaux (Sc3)	13
5.2.2 Fonctions et unités fonctionnelles	13
5.2.3 Frontières du système à l'étude.....	13
5.2.4 Méthodes d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts	15
5.2.4.1 TRACI.....	15
5.2.5 Logiciel de modélisation.....	17
5.2.6 Interprétation des résultats	17
5.2.7 Limites de l'étude	17
5.3 Inventaires et données pour analyse de cycle de vie.....	18
5.3.1 Approche de collecte de données.....	18
5.3.1.1 Collecte de données primaires	18
5.3.1.2 Collecte de données secondaires	18

5.3.2 Inventaires.....	19
5.3.2.1 Étape de production des matériaux (A1-A3)	19
5.3.2.2 Analyse de l'inventaire et agrégation des données.....	28
5.3.2.3 Étape de fin de vie (C1-C4).....	31
6. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	38
6.1 Analyse d'impacts environnementaux	38
6.1.1 Analyse d'impacts des scénarios sur 60 ans.....	38
6.1.1.1 Analyse comparative des impacts totaux des scénarios	38
6.1.1.2 Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie	39
6.1.1.3 Analyse de contribution des matériaux à l'étape de production (A1-A3)	41
6.1.2 Analyse d'impacts des scénarios sur 120 ans	43
6.1.2.1 Analyse comparative des impacts totaux des scénarios	43
6.1.2.2 Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie	44
6.1.2.3 Analyse de contribution des matériaux à l'étape de production (A1-A3)	45
6.2 Estimation des coûts de construction	47
7. ANALYSE DE SENSIBILITÉ	50
7.1 Prise en compte de la production évitée résultant du réemploi (Module D)	50
7.2 Méthode d'analyse d'impacts environnementaux alternative	52
8. DISCUSSION.....	53
9. GRILLE D'ÉVALUATION CPD/A.....	54
10. CONCLUSIONS	58
11. RÉFÉRENCES	60
ANNEXE I - PHASES D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	63
ANNEXE II - COMPTES-RENDUS DES ATELIERS	65
ANNEXE III - ADAPTATION DE LA STRUCTURE : SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE ET SCÉNARIO ADAPTABILITÉ (L2C EXPERTS-CONSEILS EN STRUCTURE).....	86

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Bâtiment PAL6.....	4
Figure 2.	Scénarios comparatifs à l'étude.....	5
Figure 3.	Étapes méthodologiques de l'analyse de cycle de vie.....	7
Figure 4.	Croquis de la trame structurale du bâtiment tel que construit.....	9
Figure 5.	Croquis annoté de la nouvelle trame structurale.....	10
Figure 6.	Trame structurale et disposition des murs de refend du scénario adaptabilité.....	11
Figure 7.	Schémas illustratifs des jonctions verticales et horizontales.....	12
Figure 8.	Schéma illustratif de la fixation des vis de jonction.....	12
Figure 9.	Frontières du système sur 60 ans.....	14
Figure 10.	Frontières de système sur 120 ans.....	15
Figure 11.	Impacts totaux des scénarios.....	39
Figure 12.	Analyse de contribution aux impacts des étapes du cycle de vie.....	40
Figure 13.	Analyse de contribution de l'étape production du scénario de référence par matériau.....	41
Figure 14.	Analyse de contribution de l'étape production du scénario préfabrication par matériau.....	42
Figure 15.	Analyse de contribution de l'étape production du scénario matériaux par matériau.....	42
Figure 16.	Impacts totaux des scénarios.....	44
Figure 17.	Analyse de contribution aux impacts des étapes du cycle de vie.....	45
Figure 18.	Analyse de contribution de l'étape production du scénario de référence par matériau.....	46
Figure 19.	Analyse de contribution de l'étape production du scénario adaptabilité par matériau.....	46
Figure 20.	Analyse de contribution des coûts par élément.....	49
Figure 21.	Coûts de construction au pied carré (\$/pi²).....	50
Figure 22.	Empreinte carbone du scénario préfabrication incluant la production évitée (module D).....	51
Figure 23.	Empreinte carbone du scénario matériaux incluant la production évitée (module D).....	52
Figure 24.	Analyse de sensibilité : Impacts totaux du scénario adaptabilité selon IMPACT 2002+.....	52
Figure 25.	Analyse de sensibilité : Impacts totaux des scénarios préfabrication et matériaux selon IMPACT 2002+.....	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Principaux principes de conception cités dans CSA Z782-06 et ISO 20887.....	2
Tableau 2.	Synthèse des différences entre scénarios.....	6
Tableau 3.	Données et contraintes de conception.....	9
Tableau 4.	Caractéristiques de la trame structurale.....	10
Tableau 4.	Indicateurs environnementaux considérés.....	16

Tableau 5. Inventaire des matériaux par éléments.....	21
Tableau 6. Inventaire agrégé des matériaux	29
Tableau 7. Liste des processus utilisés dans SimaPro	30
Tableau 8. Poids total des matériaux traités en fin de vie	31
Tableau 9. Énergie de démolition (module C1).....	32
Tableau 10. Transport vers le centre de tri	32
Tableau 11. Énergies de triage au centre de tri.....	33
Tableau 12. Estimation du traitement des matières résiduelles issues du secteur CRD en 2018 au Québec (en tonnes).....	33
Tableau 13. Rendement estimé du centre de tri par matériau.....	34
Tableau 14. Distribution massique du vrac au sortir du centre de tri par scénario (tonnes)	35
Tableau 15. Transport des matières résiduelles vers l’enfouissement	37
Tableau 16. Processus de modélisation de fin de vie.....	37
Tableau 17. Flux de matières en fin de vie.....	37
Tableau 18. Analyse de contribution des matériaux aux émissions de GES des scénarios préfabrication (Sc2) et matériaux (Sc3)	43
Tableau 19. Analyse de contribution des matériaux aux GES du scénario adaptabilité (Sc1)	47
Tableau 20 Coûts de construction des scénarios étudiés (\$2019)	49
Tableau 21. Grille d’évaluation CpD/A	55

ABBREVIATIONS

3RV-E : Hiérarchie de gestion des matières résiduelles priorisant la réduction (R) au réemploi, le réemploi (R) au recyclage, le recyclage (R) à la valorisation énergétique (V) et la réduction de l'élimination (E).

ACV : Analyse du cycle de vie.

BIM : Modélisation des informations du bâtiment. Traduit de l'anglais *Building information modeling*.

CNB : Code national du bâtiment.

CpD/A : Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité. Traduit de l'anglais *Design for disassembly and adaptability* (DfD/A).

CSA : Association canadienne de normalisation.

CRD : Construction, rénovation et démolition, fait référence à la provenance des matières résiduelles telles que le bois par exemple.

DEP : Déclaration environnementale de produit. Traduit de l'anglais *Environmental product declaration* ou EPD.

DfD/A : Design for disassembly and adaptability (DfD/A).

ÉICV : Évaluation des impacts de cycle de vie.

GES : Gaz à effet de serre.

ICV : Inventaire de cycle de vie.

ISO : Organisation internationale de normalisation.

kPa : kilopascal, unité de pression (ou de contrainte) du système international d'unités.

MDF : *Medium density fiber panel*, panneau de fibres de bois de densité moyenne.

SOMMAIRE

Ce rapport présente les résultats d'une démarche d'écoconception portant sur un bâtiment de six étages en ossature légère situé dans le quartier Pointe-aux-Lièvres à Québec (bâtiment PAL6). PAL6 a une superficie totale habitable de 5052 mètres carrés et comprend 59 unités de logement social. La démarche d'écoconception a été réalisée avec l'apport de plusieurs collaborateurs dont STGM architectes, L2C experts-conseils, Structure RBR, Recyc-Québec et le ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs (MFFP).

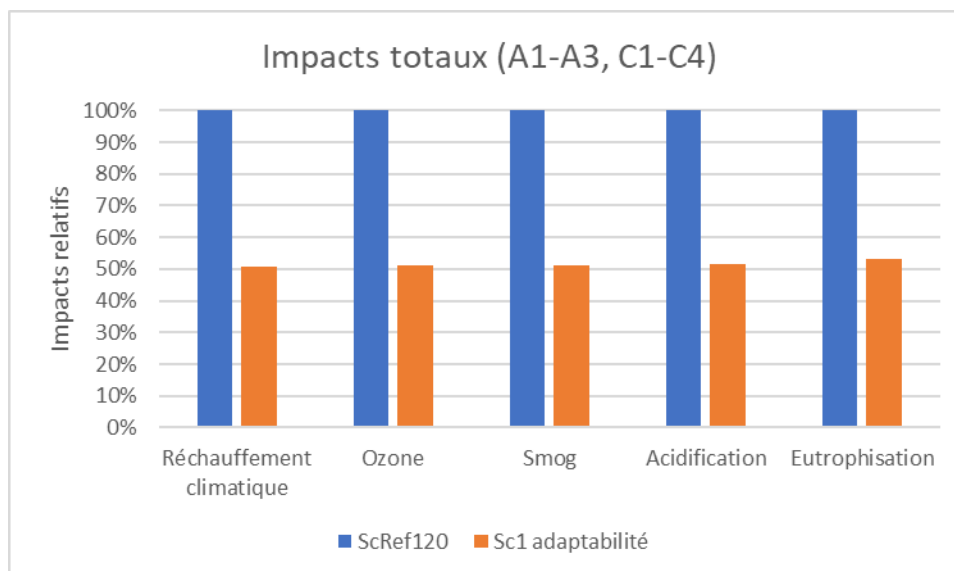
L'approche d'écoconception préconisée est celle de la CpD/A (en anglais *Design for Disassembly and Adaptability* ou DfD/A), c'est-à-dire la conception pour la démontabilité et l'adaptabilité. L'objectif visé était de réduire les émissions intrinsèques, et l'empreinte carbone en particulier, du bâtiment actuel en étudiant des concepts alternatifs définis dans une démarche de cocréation. En plus de cet objectif principal, deux autres objectifs étaient visés, soit d'étudier les coûts associés à la mise en œuvre des principes CpD/A et proposer une grille d'évaluation CpD/A.

Au-delà du scénario de référence (ScRef), trois scénarios alternatifs (Sc1, Sc2 et Sc3) ont été analysés. Le scénario Sc1 adaptabilité visait l'adaptabilité du bâtiment, c'est-à-dire la capacité de changer l'utilisation du bâtiment en cours d'utilisation. Les deux autres scénarios (Sc2 et Sc3) visaient davantage la démontabilité. Le scénario Sc2 préfabrication misait sur la préfabrication et la standardisation des murs extérieurs pour favoriser la démontabilité et le réemploi. Le scénario Sc3 matériaux misait quant à lui sur le choix des matériaux.

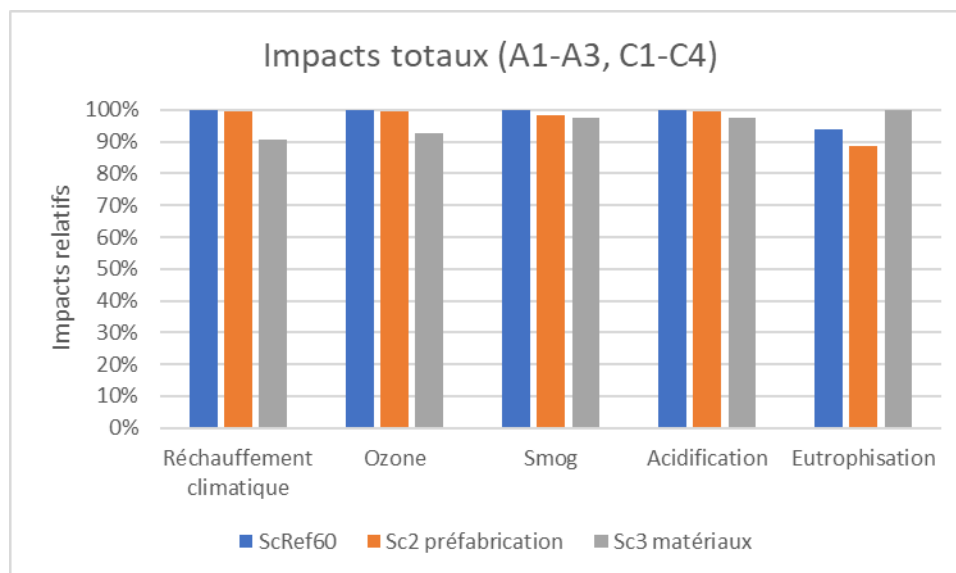
Une analyse de cycle de vie (ACV) et une estimation des coûts de construction ont été réalisées pour chacun des quatre bâtiments à l'étude. La portée de l'ACV inclut les étapes de production (modules A1-A3) et de fin de vie (modules C1-C4) mais exclut l'étape d'opération des bâtiments (module B).

Quatre grands constats se dégagent du travail effectué :

1. Il est possible d'appliquer les principes de CpD/A à la construction à ossature légère en bois dans des bâtiments de moyenne hauteur.
 - L'analyse effectuée montre que l'application de ces principes CpD/A n'entraînerait pas de hausse significative des coûts de construction.
2. La fin de vie des bâtiments étudiés contribue environ à 17 % de l'empreinte carbone sur la portée du cycle de vie pour l'ensemble des bâtiments étudiés.
3. La plus grande réduction potentielle d'émissions de GES (-50 %) est attribuable à l'augmentation de la durée de vie du bâtiment provenant de l'application de principes d'adaptabilité, c'est-à-dire polyvalence, convertibilité et capacité d'agrandissement (voir section 2).



4. L'application des principes de démontabilité entraîne des réductions moindres atteignant un maximum de 9 % (scénario Sc3 matériaux). Bien qu'exclue, la prise en compte de la production évitée résultant de la réutilisation de certains éléments et matériaux augmenterait la réduction de sorte qu'elle atteint 16 %.
- Une analyse plus poussée des processus utilisés dans la modélisation permettrait de raffiner les résultats de cette analyse.



Au terme de cette étude, les recommandations avancées sont de:

- Évaluer la mise en place d'incitatifs réglementaires, financiers ou autres permettant de réduire les émissions de GES et les matières résiduelles générées en fin de vie des bâtiments;

- Éduquer les professionnels de la construction et les manufacturiers de produits de construction sur l'importance d'intégrer les considérations de fin de vie au début du processus de conception des produits et bâtiments et, de ce fait, participer au développement d'une économie circulaire;
- Poursuivre le développement de la grille d'évaluation CpD/A notamment en consultant les professionnels de l'industrie et les autres parties prenantes incluant les occupants des bâtiments et la société civile;
- Développer des inventaires de gestion des matières résiduelles et de produits de construction innovants spécifiques au Québec afin de préciser les résultats obtenus.

1. INTRODUCTION

Les préoccupations de la population au sujet du développement durable, de la gestion des ressources et des matières résiduelles ont un effet sur un nombre grandissant de secteurs économiques incluant le bâtiment. Recyc-Québec rapporte que plus de 55 % des matières résiduelles issues du secteur de la construction sont du bois, sous toutes les formes (Recyc-Québec, 2020). Comme c'est le cas avec l'ensemble des produits et matériaux, il y a un intérêt à réduire l'élimination du bois et à privilégier son réemploi et son recyclage dans la perspective du 3RV-E¹. Une des manières d'atteindre cet objectif serait de concevoir des bâtiments en tenant compte de la fin de vie de ceux-ci, et/ou en ayant à l'esprit les possibles changements d'usage de ceux-ci.

La conception pour la démontabilité (CpD/A) et l'adaptabilité, ou *Design for Disassembly and Adaptability* (DfD/A) en anglais, est une approche en matière de durabilité qui permet de réduire l'empreinte écologique de la construction. Elle favoriserait la diminution des déchets générés, l'augmentation de la durée de vie des bâtiments et la réduction de la consommation d'énergie par le biais de la conception intelligente.

L'association canadienne de normalisation (CSA) a produit en 2006 des lignes directrices pour outiller les architectes, les ingénieurs et autres parties prenantes à intégrer les principes de CpD/A (CSA, 2006). Ces lignes directrices font actuellement l'objet d'une norme internationale ISO 20887:2020 intitulée : *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil - Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité - Principes, exigences et recommandations*.

Le présent projet s'inscrit dans le cadre du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 (ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 2012) programme du Fonds Vert du Québec dont une des mesures vise le développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone. Le gouvernement du Québec s'intéresse à l'intégration des matériaux sobres en carbone comme stratégie pour atteindre ses cibles de réduction des gaz à effet de serre (GES).

2. CONCEPTION POUR LA DÉMONTABILITÉ ET L'ADAPTABILITÉ (CPD/A)

La CpD/A s'articule autour d'une série de principes définis dans les normes et guides CSA et ISO citées en introduction ainsi que d'autres guides pratiques en la matière (Guy, Ciarimboli, & Nicholas, s.d.) (Morgan & Stevenson, 2005). Ces principes (Tableau 2Tableau 1) peuvent être appliqués à différents niveaux d'analyse, soit les matériaux, les sous-composantes, les composants ou assemblages, les éléments ou les systèmes, ce qui confère aux utilisateurs une grande flexibilité laissant ainsi place à la créativité nécessaire pour innover dans la conception de bâtiments plus résilients et alignés avec les objectifs du développement durable.

¹ 3RV-E est un acronyme utilisé pour décrire la hiérarchie dans le traitement des matières résiduelles. Il désigne la priorité donnée à la réduction, le réemploi, le recyclage, la valorisation énergétique et l'élimination, dans cet ordre.

https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_deve_durable/fiches/principe_des_3r_v_e.html

Tableau 1. Principaux principes de conception cités dans CSA Z782-06 et ISO 20887

		Description
Principes d'adaptabilité	Polyvalence	Capacité d'assurer différentes fonctions en apportant des modifications mineures aux systèmes. Les modifications devraient être réalisables en moins d'une semaine.
	Convertibilité	Capacité d'adaptation à des changements substantiels des besoins des utilisateurs par la réalisation de modifications mineures.
	Capacité d'agrandissement	Capacité d'un système dont la conception ou la caractéristique lui permet de s'adapter à des changements substantiels, favorisant ou facilitant l'ajout de nouveaux espaces par l'expansion horizontale (extension des espaces existants) ou verticale (ajout d'étages).
Principes de démontabilité	Facilités d'accès aux composants et services	Capacité d'accéder aux éléments et systèmes du bâtiment ayant des durées de vie relativement courtes. Elle peut être facilitée par des connexions pouvant être défaites et/ou désassemblées pour faciliter les modifications et les ajouts aux structures. ²
	Connexions réversibles	Connexions faciles à défaire et qui permettent des modifications à la structure.
	Indépendance	Qualité permettant de retirer, de réparer ou de remplacer des pièces, composants modules et systèmes sans nuire aux performances des systèmes adjacents.
	Finitions inhérentes	Caractéristique d'un matériau qui est laissé dans son état le plus simple, naturel et minimalement transformé, p. ex. sans contamination causée par l'application d'une finition.
	Conception soutenant des modèles économiques d'économie circulaire	Choix de matériaux et de compositions de systèmes permettant de récupérer des matériaux en cours de cycle de vie ou en fin de vie dans un état acceptable pour le réemploi et le recyclage.
	Simplicité	Qualité d'un assemblage ou d'un système conçu simplement, facile à comprendre et ayant un faible niveau de personnalisation.
	Normalisation/standardisation	Choix de dimensions établies (p. ex. modulaires ou génériques) permettant de réduire le nombre d'éléments différents ou propriétaires utilisés dans le bâtiment.
	Sécurité du démontage	Capacité à démonter des éléments du bâtiment avec un risque acceptable pour les travailleurs et ouvriers impliqués.
	Durabilité	Capacité d'exister longtemps sans nuire aux performances ou à la vie utile du bâtiment.
	Documentation des renseignements relatifs au désassemblage	Les caractéristiques de conception qui se prêtent au désassemblage à n'importe quelle étape du cycle de vie devraient être documentées au moyen de dessins, de manuels de désassemblage ou de tout autre moyen efficace qui permet d'entreposer, de mettre à jour et de consulter ultérieurement ces renseignements, au moment où la nécessité d'apporter des changements se fait sentir ou si un élément est arrivé au terme de son cycle de vie.

Sources : (ISO, 2020) (CSA, 2006)

D'autres principes complémentaires sont déclinés dans les deux ouvrages et références cités précédemment. Des recoupements existent entre les principes de telle sorte qu'une stratégie de conception peut satisfaire plusieurs principes de manière simultanée.

² Chevauchement avec le concept d'indépendance et la stratégie de découplage des systèmes.

3. ÉQUIPE DE PROJET

Les chercheurs de FPIInnovations souhaitent souligner la contribution des partenaires ayant contribué à ce projet. Ils sont répertoriés par organisation ci-dessous :

STGM architectes

Stéphan Langevin – Architecte associé

Paule Bourdon – Architecte

Christian Glaude – Directeur BIM

Simon-Pierre Fortier – Architecte

Structures RBR

Marc Asselin – Ingénieur

Uniboard

Guy Perkins – Directeur régional des ventes

Pierre Martin – Directeur technologie et innovation

Recyc-Québec

Luc Morneau – Conseiller en gestion de matières résiduelles

Jérôme Cliche – Agent de développement industriel

Société d’habitation du Québec (SHQ)

Nathalie Doyon – Architecte à la direction de l’expertise conseil

FPIInnovations

Dieudonné Batsy – Chercheur développement durable

Camille Laflamme – Stagiaire (Université de Sherbrooke)

Patrick Lavoie – Chercheur sénior développement durable

Cassandra Lafond – Chercheure construction durable

Samuel Cuerrier-Auclair – Chercheur construction durable

Vincent Blanchard – Gestionnaire environnement et développement durable

Sylvain Gagnon – Gestionnaire construction durable

L2C experts conseils en structure

Jean-Philippe Carrier – Associé principal

Julien Leclerc – Ingénieur en structure

Fermacell

Sylvain Lallier-Couture – Responsable du développement

Sika Canada

Pierre-Luc Samson – Représentant technique des ventes

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

Martin Fréreau – Ingénieur

Julien Brousseau – Ingénieur

Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI)

Claude Maheux-Picard – Directrice générale

4. DÉFINITION DES SCÉNARIOS

4.1 Description sommaire du bâtiment tel que construit

Un logement social de six étages situé à Pointe-aux-Lièvres (PAL6) a été utilisé comme bâtiment de référence pour cette étude de cas. Le bâtiment a une superficie habitable de 5052 m² et a été conçu pour satisfaire les exigences sismiques du code national du bâtiment (CNB) pour la classe E. La classe E est très exigeante et rarement rencontrée dans la pratique. Les contraintes de cisaillement et les contraintes gravitaires, imposées par la classe sismique E, nécessitent un surdimensionnement des éléments structuraux tels que les murs de refend et les diaphragmes comparativement à un bâtiment de type standard conçu sur un sol de classe sismique moins contraignante telle que la classe C. Le bâtiment tel que construit était alors difficilement adaptable à cause de ses nombreux murs de refend. Pour cette raison, le bâtiment a été converti en classe C qui est la plus commune.

La Figure 1 donne un aperçu du bâtiment PAL6. Le scénario de référence et trois scénarios alternatifs ont été définis et sont illustrés à la Figure 2 afin d'effectuer leur comparaison. Le Tableau 2 souligne les différences notables entre le scénario de référence et les scénarios alternatifs.



PAL6 : Bâtiment résidentiel de six étages

Localisation : Écoquartier de Pointe-aux-Lièvres, Québec

Année de construction : 2016

Structure : Ossature légère (bois)

Nombre d'unité : 59

Surface moyenne d'une unité : 85,6 m²

Nombre d'étages : 6

Superficie habitable : 5052 m²

Figure 1. Bâtiment PAL6

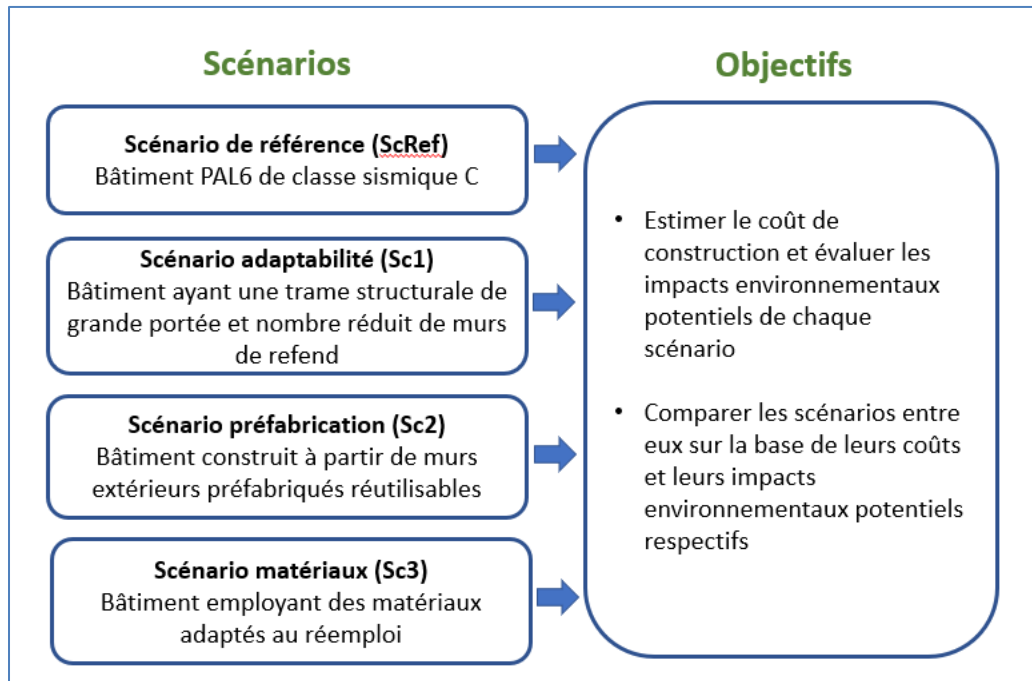


Figure 2. Scénarios comparatifs à l'étude

4.2 Scénario de référence : Bâtiment PAL6 de classe sismique C

Le bâtiment actuel est construit sur un sol argileux ou à faible capacité. C'est la raison pour laquelle il a été construit en ossature légère avec une fondation en pieux et non pas en béton armé. Il s'agit d'une des classes sismiques les plus exigeantes du code national du bâtiment (Conseil National de Recherche du Canada, 2010). La classe sismique E rend la conception d'un bâtiment adaptable ardue en raison du nombre de murs de refend nécessaires.

Étant donné le caractère exploratoire du présent projet et l'intention d'étudier l'application de ces principes à un grand nombre de bâtiments, il a été décidé de travailler sur bâtiment de classe C et non pas de classe E. Ce choix offre aux concepteurs plus de marge de manœuvre pour intégrer les principes CpD/A et permet d'étudier des options applicables à la plupart des bâtiments de six étages en ossature légère. Le bâtiment existant (classe E) a été converti en bâtiment de classe C sur la base des connaissances et modèles de conception des ingénieurs impliqués dans le projet.

4.3 Scénario adaptabilité (Sc1)

Un bâtiment adaptable a la capacité d'être facilement modifié ou adapté en vue d'une utilisation autre que celle pour laquelle le bâtiment avait été conçu initialement (CSA, 2006). Le scénario adaptabilité a été conçu avec une trame structurale ayant de plus grandes portées et un nombre moindre de murs de refend. Le scénario d'adaptabilité intègre aussi les contraintes de dimensionnement des éléments structuraux qui tiennent compte des charges au plancher aptes à supporter différents types d'usage ultérieur du bâtiment. Ces caractéristiques apportent plus de flexibilité dans l'aménagement des espaces intérieurs.

4.4 Scénario démontabilité axé sur la préfabrication (Sc2)

Ce scénario mise sur l'utilisation des éléments préfabriqués afin de favoriser le réemploi. La structure et l'enveloppe de ce bâtiment sont comparables à celles du scénario de référence. La seule différence entre ce scénario et le scénario de référence est l'utilisation de panneaux préfabriqués ouverts³ pour les murs extérieurs. Le système de connexion des murs utilise une double lisse haute et double lisse basse et des bandes de métal facilite la démontabilité. La standardisation des panneaux en dimension ayant un multiple de quatre pieds linéaires facilite une utilisation ultérieure.

4.5 Scénario démontabilité axé sur les matériaux (Sc3)

Ce scénario met l'accent sur l'utilisation de matériaux plus adaptés au réemploi et au recyclage. À l'inverse du scénario préfabrication, le scénario démontabilité a la même trame structurale que le scénario de référence. En revanche, les compositions de certains planchers et cloisons diffèrent du scénario de référence. Ce scénario utilise des matériaux tels que le Fermacell, ou les panneaux de fibres à densité moyenne (ou *Medium Density Fibreboard* - MDF) comme matériaux alternatifs au gypse dans certains planchers et cloisons. Ces matériaux sont plus faciles à désinstaller et permettent un réemploi en fin de vie.

Tableau 2. Synthèse des différences entre scénarios

Scénarios	Caractéristiques des scénarios
Scénario de référence	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bâtiment de classe sismique C ○ Contraintes des charges de plancher : 1,9 kPa
Scénario adaptabilité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Trame structurale favorisant l'adaptabilité <ul style="list-style-type: none"> ○ Contraintes des charges de plancher : 2,4 kPa ○ Changement d'orientation du sens des solives ○ Diminution du nombre de murs de refend par rapport au scénario de référence ○ Double contreplaqué dans les murs de refend pour augmenter leur résistance aux forces gravitaires et contraintes de cisaillement (principalement dans les murs de corridors) ○ Bâtiment de classe sismique C
Scénario préfabrication	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Murs extérieurs préfabriqués <ul style="list-style-type: none"> ○ Contraintes des charges au plancher : 1,9 kPa ○ Standardisation des panneaux muraux (dimensions par multiples de 4 pieds) ○ Conception utilisant des lisses supplémentaires et connexions réversibles ○ Compositions des murs extérieurs équivalentes au scénario de référence ○ Bâtiment de classe sismique C

³ Panneaux préfabriqués ouverts comportant une ossature légère et des panneaux structuraux. La finition des murs (p. ex. pose du gypse et fenêtres) est effectuée sur le site.

https://quebecwoodexport.com/assets/uploads/QWEB_DEP-FR_Murs-ouverts_VersionR%C3%A9vis%C3%A9e1.2_Juillet-2019_vf.pdf

Scénario matériaux

▪ Utilisation de matériaux favorisant le réemploi en fin de vie du bâtiment

- Contraintes des charges de plancher : 1,9 kPa
- Remplacement du gypse par du Fermacell et du MDF dans certains planchers et cloisons (diminuer les matières résiduelles générées en fin de vie)
- Balcons favorisant le désassemblage (connexions réversibles simples)
- Toiture durable fixée mécaniquement (durabilité, connexions réversibles)
- Bâtiment de classe sismique C

5. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'identifier et d'inventorier les flux environnementaux (intrants et extrants) d'un système de produits donné tout au long de son cycle de vie. L'ACV utilise ainsi les flux inventoriés pour évaluer les impacts environnementaux potentiels associés au système de produits. L'ACV est un cadre méthodologique encadré par les normes ISO 14040/44. Le cadre comprend quatre étapes telles que présentées à la Figure 3, à savoir: objectifs et champ d'étude; inventaire du cycle de vie; évaluation de l'impact du cycle de vie (ÉICV); et interprétation. Les quatre étapes sont décrites à l'annexe I.

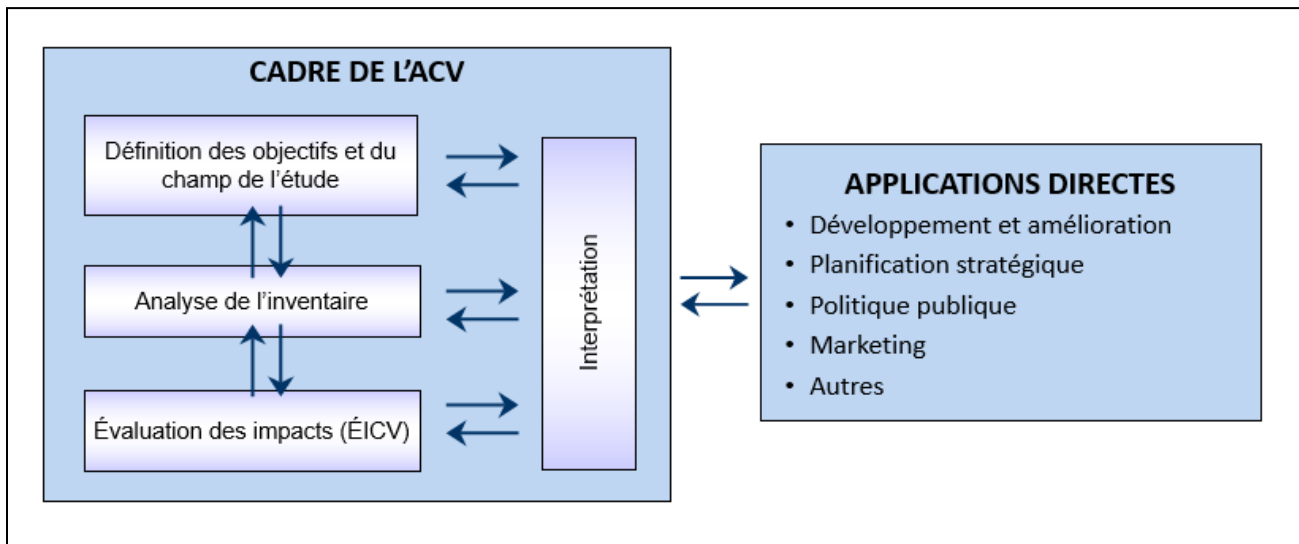


Figure 3. Étapes méthodologiques de l'analyse de cycle de vie

Source : (ISO, 2016)

5.1 Objectifs et champ d'étude

5.1.1 Objectifs

La présente étude vise à étudier le potentiel de réduction des GES qu'il est possible d'atteindre en incorporant les principes de CpD/A dans le cadre d'une étude de cas spécifique, soit le bâtiment PAL6. L'approche adoptée est

celle de l'écoconception, c'est-à-dire l'amélioration du bâtiment existant par l'application de stratégies visant à réduire l'empreinte environnementale du bâtiment repensé en comparaison avec le scénario de référence. La comparaison se fera par l'entremise d'une analyse de coûts de construction et d'une ACV. Une approche de conception intégrée a été privilégiée de sorte à mettre en commun les expertises au service de l'intégration des principes DfD/A.

5.1.2 But de l'étude

La raison d'être de cette étude est de contribuer au développement des connaissances sur les matériaux sobres en carbone dans le contexte du Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020 (PACC 2013-2020) et plus spécifiquement la mesure 19.4.3. L'étude est aussi motivée par l'intérêt de mettre à profit les bâtiments, et l'industrie de la construction de manière générale, au service de la lutte aux changements climatiques et du développement durable. Pour ce faire, il est pertinent d'étudier la faisabilité technique et économique de la conception pour la démontabilité, tout en évaluant les implications environnementales potentielles d'une telle conception.

5.1.3 Auditoire visé

Cette étude est réalisée pour le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et pour le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC). L'auditoire visé est considéré comme étant non technique. Ce rapport ne fera pas l'objet d'une révision par un comité externe.

5.1.4 Applications prévues et portée de l'étude

Les résultats de cette étude serviront à donner un aperçu des émissions potentielles de GES et des coûts associés aux bâtiments conçus selon les principes de CpD/A. Les résultats de cette étude pourront aider les professionnels du domaine de la construction tels que les ingénieurs, architectes, promoteurs immobiliers, etc., à faire des choix de conception structurale (éléments structuraux) et architecturale (matériaux et finitions). En outre, cette étude permettra de produire des connaissances sous la forme de données, des informations et concepts sur les matériaux et systèmes sobres en carbone facilitant l'atteinte des cibles provinciales de réduction des émissions de GES.

5.2 Champ de l'étude

5.2.1 Description technique des systèmes

5.2.1.1 Scénario de référence (ScRef)

La Figure 4 présente le plan du bâtiment tel que construit. Les murs colorés illustrent le positionnement actuel des murs de refend du bâtiment existant. En réponse à cette problématique, une nouvelle stratégie de conception a été envisagée afin de permettre la conception d'un bâtiment facilement adaptable en fin de vie utile. Ainsi, la structure du bâtiment existant a été révisée en conséquence en considérant les caractéristiques d'un sol de classe sismique C. Pour ce faire, la firme de génie-conseil L2C experts-conseils a reçu le mandat de redimensionner la structure du bâtiment existant de classe sismique E afin de le convertir en classe sismique C, tout en préservant la trame structurale existante. Le tableau ci-dessous présente les données essentielles prises en compte dans les calculs du redimensionnement.

Tableau 3. Données et contraintes de conception

Bâtiment tel que construit	Scénario de référence
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Classe sismique E ✓ Charge morte au toit : 1,7 kPa ✓ Charge de neige au toit : 3,48 kPa (Québec) ✓ Contraintes de charges vives au plancher : 1,9 kPa ✓ Calculs effectués selon le code canadien ✓ Charge de vent : 0,41 kPa (Québec) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Classe sismique C ✓ Charge morte au toit : 1,7 kPa ✓ Charge de neige au toit : 3,48 kPa (Québec) ✓ Contrainte de charges vives au plancher : 1,9 kPa ✓ Calculs effectués selon le code canadien ✓ Charge de vent : 0,41 kPa (Québec)

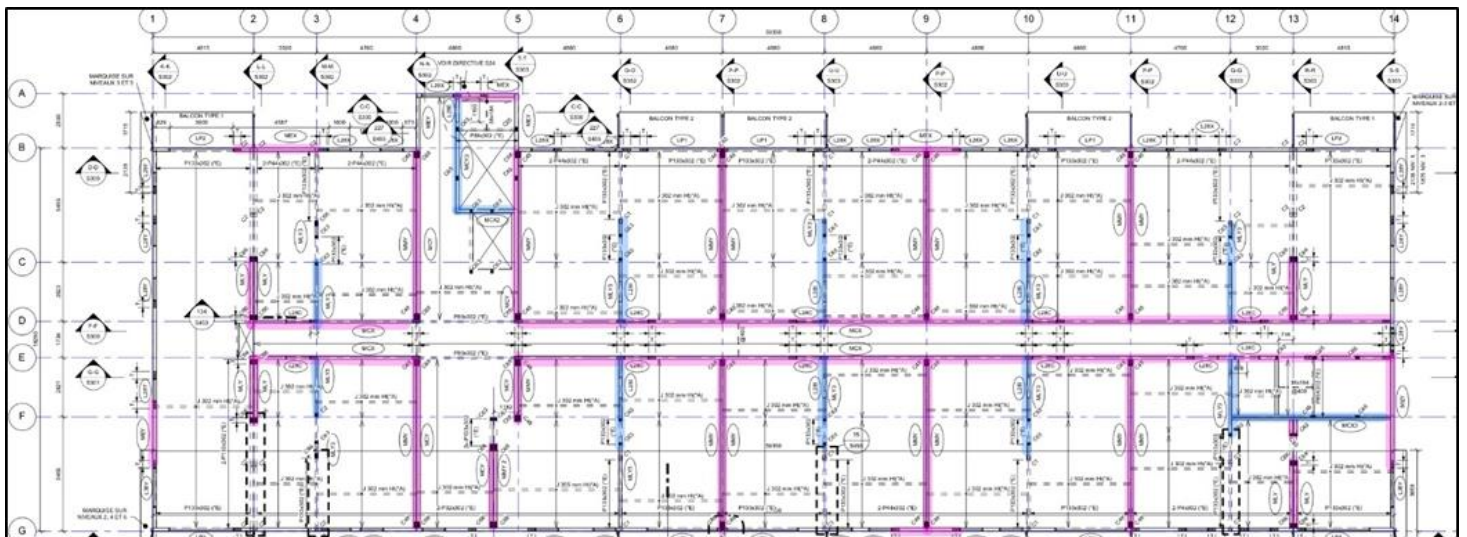


Figure 4. Croquis de la trame structurale du bâtiment tel que construit

Note : Les traits roses indiquent l'emplacement des murs de refend.

5.2.1.2 Scénario adaptabilité (Sc1)

La trame structure du bâtiment de référence a été revue afin d'obtenir un bâtiment adaptable à d'autres usages :

- Concevoir une nouvelle trame structurale avec de grandes portées (plus grandes superficies libres);
- Redimensionner la trame structurale sous la contrainte de charges au plancher de 2,4 kPa;
- Diminuer le nombre (et la dimension) de murs de refend; et
- Inverser le sens des solives.

La prise en compte des nouvelles contraintes au niveau des charges au plancher permet au bâtiment d'être, le cas échéant, facilement converti en édifice à bureaux. Le Tableau 4 présente les caractéristiques de la trame structurale. La Figure 5 présente un croquis annoté de la trame structurale sur lequel la nouvelle orientation des poutrelles est illustrée en orange, alors que l'orientation initiale de celles-ci est illustrée en bleu. La longueur et la disposition des murs de refend sont présentées à la Figure 6 (voir traits roses). Le plan structural détaillé du

scénario adaptabilité incluant la légende et les nouvelles compositions des murs de refend sont présentés à l'annexe III.

Tableau 4. Caractéristiques de la trame structurale

Caractéristiques de la trame structurale existante	Caractéristique de la nouvelle trame structurale
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Classe sismique E ✓ Charge morte au toit : 1,7 kPa ✓ Charge de neige au toit : 3,48 kPa (Québec) ✓ Nombre de murs de refend plus élevé ✓ Contraintes de charges vives au plancher : 1,9 kPa ✓ Calculs effectués selon le code canadien 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Classe sismique C ✓ Charge morte au toit : 1,7 kPa ✓ Charge de neige au toit : 3,48 kPa (Québec) ✓ Nombre de murs de refend moins élevé ✓ Charge morte au plancher : 2,20 kPa ✓ Contraintes de charges vives au plancher : 2,4 kPa ✓ Calculs effectués selon le code canadien

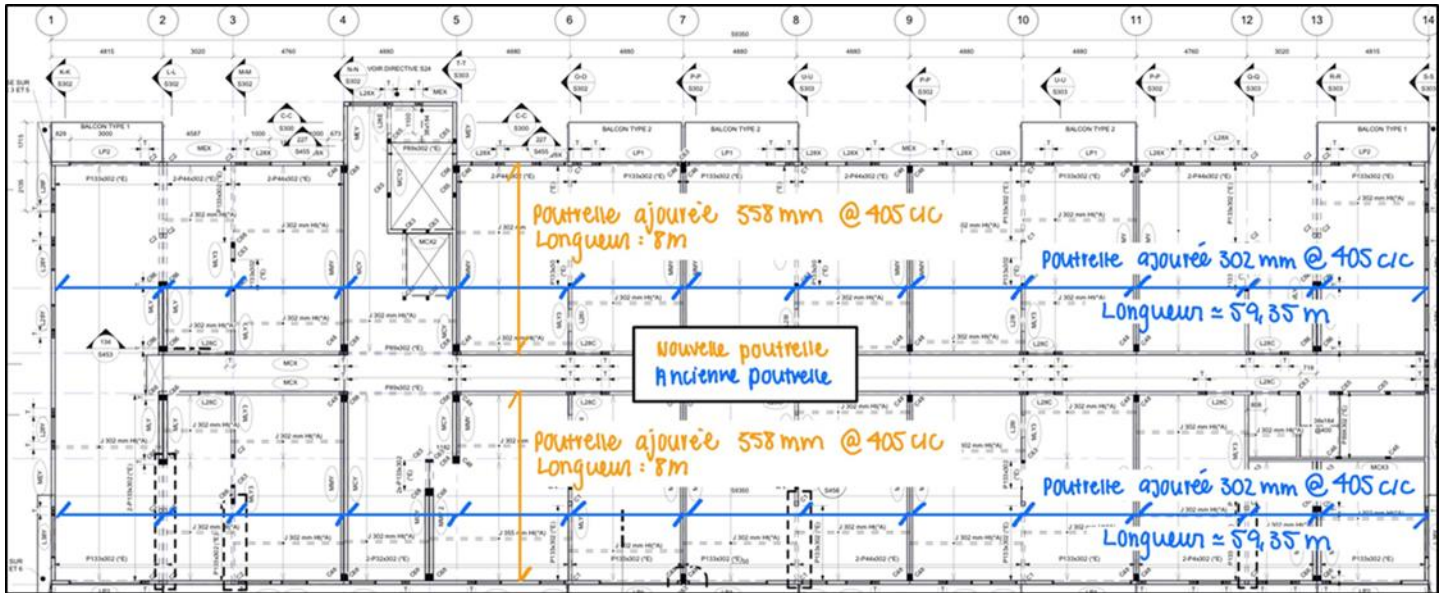


Figure 5. Croquis annoté de la nouvelle trame structurale

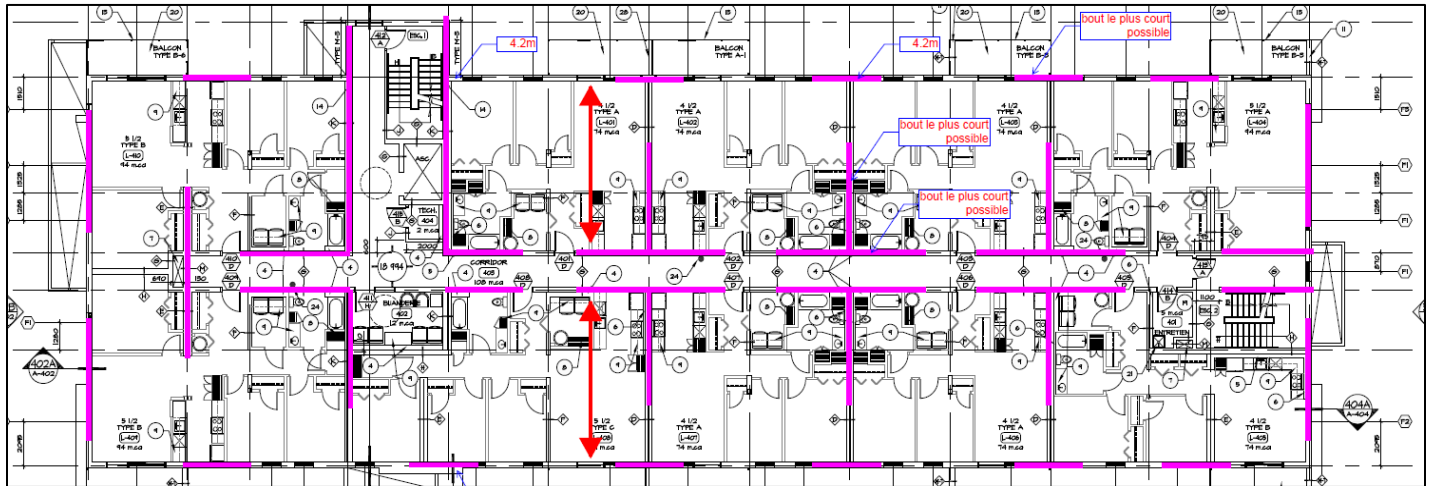


Figure 6. Trame structurale et disposition des murs de refend du scénario adaptabilité

Note : Les traits roses indiquent le nouvel emplacement des murs de refend.

5.2.1.3 Scénario préfabrication (Sc2)

Ce scénario vise la démontabilité du bâtiment en fin de vie utile en misant sur l'utilisation des éléments préfabriqués. La récupération et la réutilisation des panneaux en fin de vie est supportée par le développement d'un système de connexions réversibles. Les critères retenus dans la conception sont :

- L'utilisation de panneaux muraux préfabriqués semi-ouverts, comprenant l'ossature des panneaux et des contreplaqués et/ou panneau de carton fibre de part et d'autre. Le reste des éléments complétant les murs préfabriqués sont assemblés sur le site;
- Panneaux de dimensions standard prédéfinies
 - Bâtiment construit à partir de panneaux de longueur de multiple de quatre pieds (1200 mm); et
 - Panneaux ayant une hauteur maximale de 14 pieds pour faciliter le transport
- Utilisation de connexions verticales *plancher-mur* rigides et horizontales *panneau-panneau* tel qu'illustré à la Figure 7.

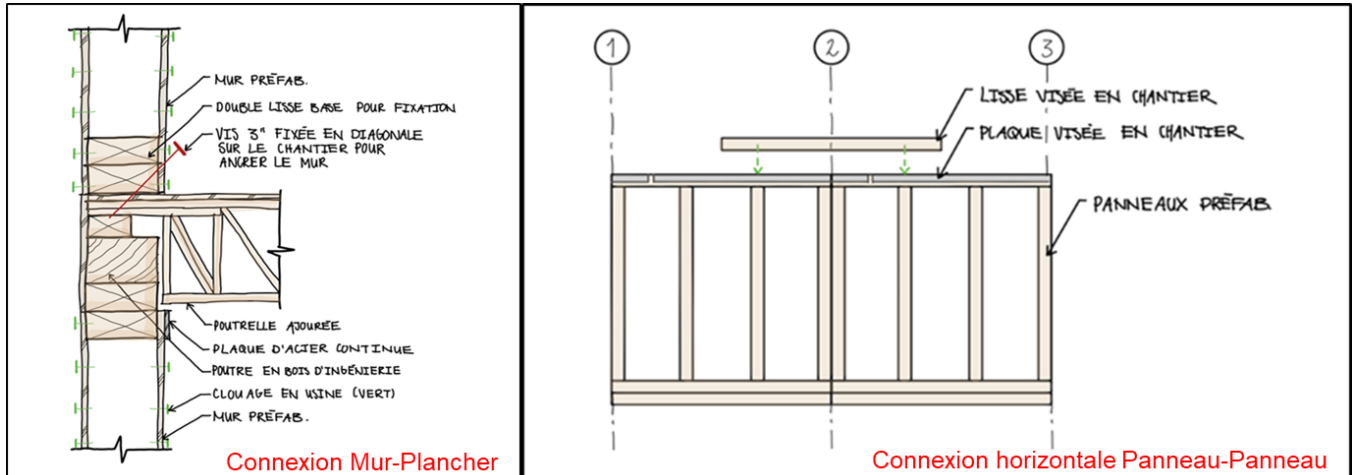


Figure 7. Schémas illustratifs des jonctions verticales et horizontales

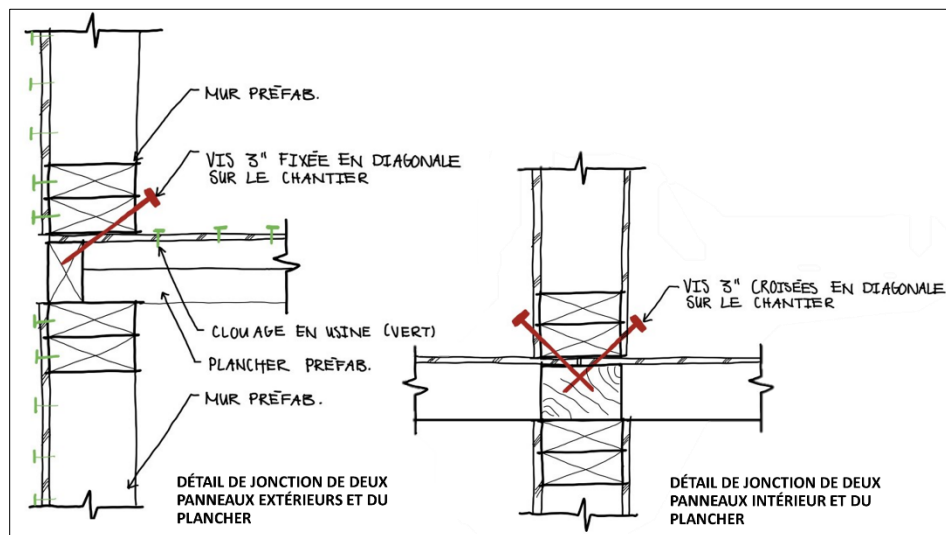


Figure 8. Schéma illustratif de la fixation des vis de jonction

Les plaques en acier faisant la jonction entre panneaux seront posées au chantier de façon à superposer deux lisses hautes. Les connexions rigides *plancher-mur* seront effectuées avec des vis de trois pouces de longueur fixées en diagonale ou croisées dans certains cas (Figure 8).

Dans la pratique, ces assemblages et connexions seraient répertoriées dans une documentation détaillée précisant les caractéristiques des panneaux utilisés lors de la construction. La numérotation, l'étiquetage et la cartographie (p. ex. BIM) des panneaux seraient des exemples de mesures mises en œuvre pour favoriser la réutilisation des panneaux et autres éléments du bâtiment.

5.2.1.4 Scénario matériaux (Sc3)

Le scénario matériaux vise l'utilisation de matériaux qui peuvent être réutilisés ou recyclés en fin de vie. Dans le cadre de cette étude, le gypse est le principal matériau dont la gestion en fin de vie est problématique (Recyc-Québec, 2018). Ainsi, ce scénario vise à trouver une alternative au gypse dès l'étape de conception. Ce scénario propose aussi l'utilisation de balcons facilement démontables et d'une membrane de toiture en PVC recyclable. Autrement dit, le scénario démontabilité présente quatre stratégies définies comme suit :

- Choix de matériaux alternatifs au gypse (Fermacell et MDF)
- Choix de balcon en fourche, une alternative au balcon existant
- Choix de membrane de toiture Sarnafil, une alternative à la membrane élastomère existante
- Choix de conception du filage électrique hors mur, une alternative au filage intramural

5.2.2 Fonctions et unités fonctionnelles

La fonction est l'élément essentiel dans une étude comparative d'ACV. Pour qu'une comparaison soit possible entre deux systèmes, il faut que ces derniers aient une fonction principale commune, même si les fonctions secondaires de l'un peuvent être différentes de celles de l'autre (Jolliett, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz, 2015). L'unité fonctionnelle établit une base de comparaison appropriée entre des systèmes fonctionnellement équivalents.

Dans le cadre de cette étude, deux fonctions sont analysées. La première fonction est **d'offrir un espace pour des logements résidentiels à un nombre d'occupants**. La deuxième fonction est **d'offrir un espace locatif pour des bureaux administratifs**.

Des fonctions énoncées ci-dessus découlent ainsi deux unités fonctionnelles :

- La première unité fonctionnelle est de fournir une superficie habitable de 5052 m² remplissant adéquatement la fonction principale de logements résidentiels pendant une durée de 60 ans de service.
 - Cette unité fonctionnelle s'applique aux scénarios de démontabilité soit le scénario préfabrication (Sc2) et le scénario matériaux (Sc3).
- La deuxième unité fonctionnelle est de fournir une superficie habitable de 5052 m² remplissant adéquatement la fonction principale de logements résidentiels pendant une durée de 60 ans de service et ensuite d'offrir un espace locatif de 5052 m² remplissant adéquatement la fonction principale d'édifice à bureaux pendant une durée de 60 ans de service pour un total de 120 ans.
 - Cette unité fonctionnelle s'applique au scénario adaptabilité (Sc1).

5.2.3 Frontières du système à l'étude

La Figure 9 présente les étapes du cycle de vie du bâtiment incluses dans les frontières du système, de l'étape de production des matériaux jusqu'à l'étape de fin de vie.

Les étapes du cycle de vie d'un bâtiment sont subdivisées en quatre modules d'information : les modules A, B, et C selon la norme EN 15978 (CEN, 2011). Ainsi, l'étape de production des matériaux comprend trois modules

d'information : A1, A2, et A3, lesquels réfèrent respectivement à l'extraction, au transport et à la transformation des matières premières.

L'étape de fin de vie du bâtiment comprend quant à elle quatre modules d'informations allant de C1 à C4, lesquels réfèrent respectivement à la démolition, le transport des déchets, le traitement des déchets et l'élimination des déchets par incinération ou par enfouissement.

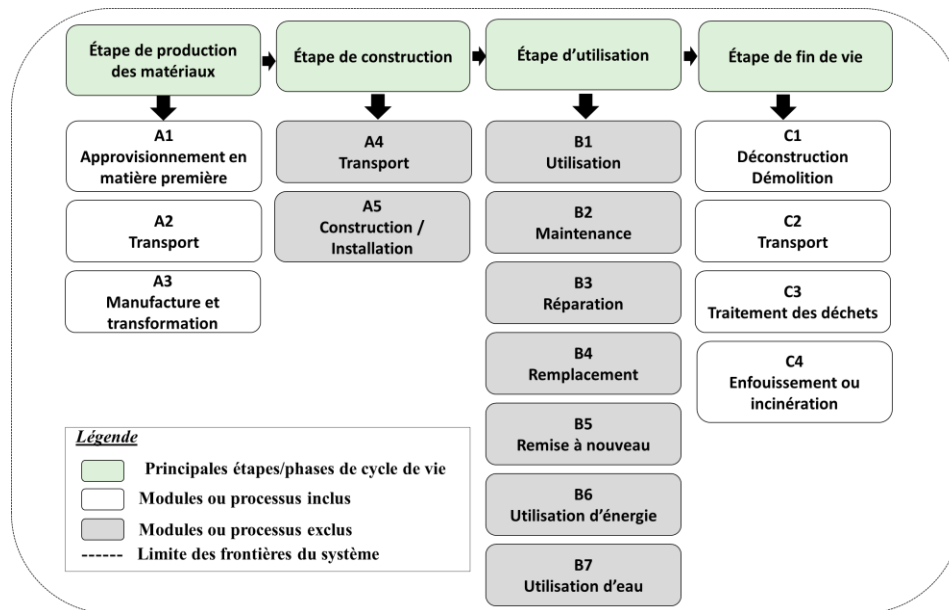


Figure 9. Frontières du système sur 60 ans

La Figure 9 illustre les modules inclus et exclus des frontières du système à l'étude. Les modules colorés en gris, ont été exclus de l'analyse, car ils sont similaires ou identiques entre les scénarios comparés. De plus, ces étapes ont été identifiées comme ayant une faible contribution dans des études antérieures (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013) (Blengini & Di Carlo, 2010).

Les processus relatifs aux services offerts par les ingénieurs et les architectes, le transport des travailleurs et professionnels, le transport de la machinerie lourde et légère vers le chantier de construction (p. ex. les grues, les véhicules, etc.) ainsi que l'utilisation de ces machineries sur le site (c'est-à-dire la consommation énergétique des machines, sous toutes les formes) ont été exclus des limites du système pour la même raison.

Il a été supposé que les bâtiments comparés ont tous des fondations sur pieux et des finitions intérieures comparables. Pour cette raison, ils sont exclus de l'inventaire. Les escaliers, cages d'ascenseur et gicleurs ont aussi été exclus de l'étude pour la même raison.

Les frontières du système du scénario de démontabilité sont présentées à la Figure 9, tandis que celles du scénario adaptabilité sont présentées à la Figure 10.

Le scénario adaptabilité est analysé sur 120 ans répartis en deux phases de 60 ans. Le bâtiment adapté en édifice à bureaux à la 61^e année est démoli une seule fois à la 120^e année. En revanche, le scénario remplissant les mêmes

fonctions que le scénario adaptabilité est composé de deux édifices distincts dont le premier est construit à l'année 0 et démolì à l'année 60, tandis que le deuxième édifice est construit à l'année 61 et démolì à l'année 120.

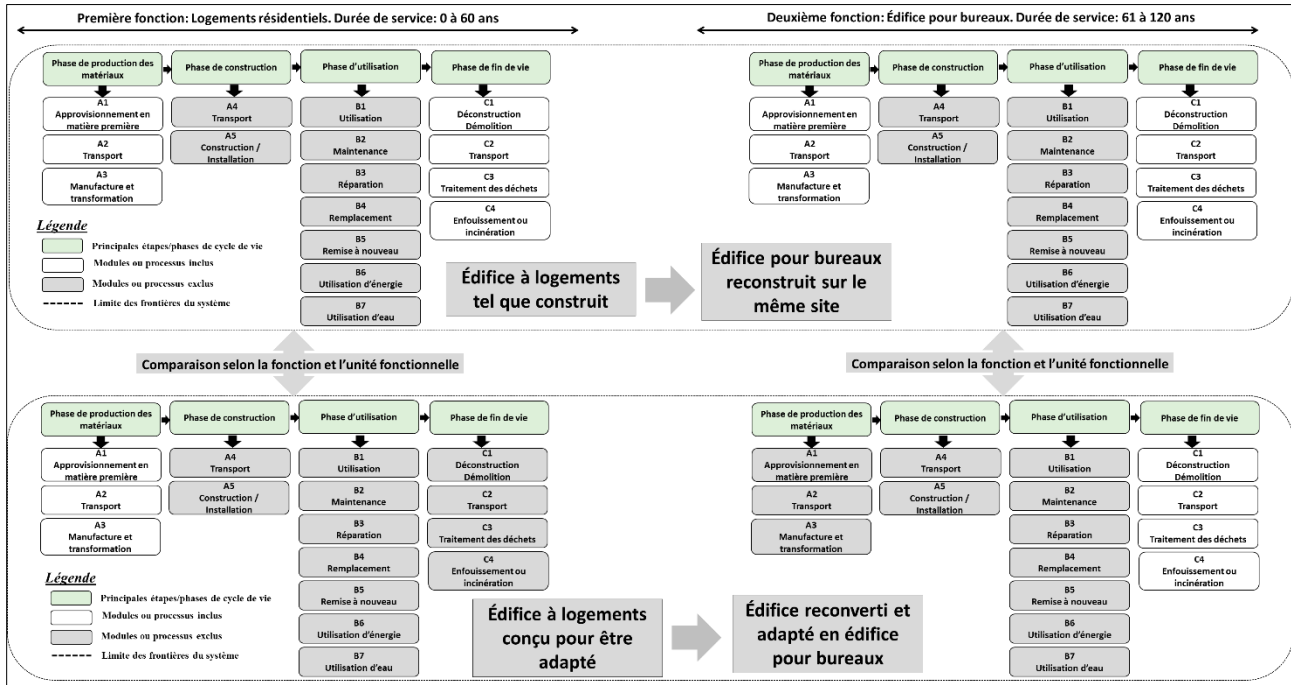


Figure 10. Frontières de système sur 120 ans

Il est important de souligner que la conversion ou l'adaptabilité d'un bâtiment peut nécessiter des travaux selon la conception du bâtiment adaptable. Toutefois, dans le cadre de cette étude, les travaux de rénovation et conversion d'un édifice à logements en édifice à bureaux ont été jugés négligeables comparativement aux travaux de construction d'un nouveau bâtiment.

5.2.4 Méthodes d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts

Cette section présente sommairement la méthode ÉICV utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux potentiels des scénarios.

5.2.4.1 TRACI

La méthode utilisée pour cette évaluation est TRACI (de l'anglais : *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*), développée par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA). TRACI permet de caractériser les flux d'inventaires en utilisant des facteurs de caractérisation spécifiques à l'Amérique du Nord (Bare, 2011). La version 2.1 de TRACI a été utilisée pour caractériser les flux d'inventaires. Les catégories d'impacts ci-dessous ont été choisies pour décrire l'ensemble des impacts potentiels sur l'environnement du cycle de vie du système étudié (Tableau 5). Afin d'assurer la robustesse des conclusions, une autre méthode d'ÉICV (IMPACT 2002+) a été utilisée en guise d'analyse de sensibilité.

Tableau 5. Indicateurs environnementaux considérés

Catégorie d'impacts	Unité
Réchauffement climatique	kg éq. CO ₂
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11
Formation de smog photochimique	kg éq. O ₃
Acidification	kg éq. SO ₂ eq
Eutrophisation	kg éq. N

Les indicateurs sont décrits ci-après.

5.2.4.1.1 Réchauffement climatique

Le réchauffement climatique correspond à l'augmentation de la température moyenne de la surface de la Terre résultant de l'augmentation des émissions de GES, telles que le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes nitreux, etc. Les GES captent la chaleur qui autrement s'échapperait de la Terre. Le réchauffement climatique est exprimé en kg d'équivalent CO₂.

5.2.4.1.2 Appauvrissement de la couche d'ozone

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, tels que les chlorofluorocarbones (CFC), entraînent une réduction de la couche d'ozone protectrice dans l'atmosphère. La réduction de l'ozone dans la stratosphère entraîne une augmentation du rayonnement ultraviolet-B atteignant la Terre, ce qui peut avoir des effets sur la santé humaine et endommager les cultures, les matériaux et la vie marine. Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est indiqué en kg équivalent de CFC-11.

5.2.4.1.3 Formation de smog photochimique

Dans certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques (oxydes d'azote (NO_x) et composés organiques volatils (COV)) provenant de l'industrie et du transport peuvent être piégées au niveau du sol. En présence de lumière solaire, ils produisent de l'ozone proche de la surface du sol (troposphère) appelée *smog photochimique*, symptôme du potentiel de création photochimique de l'ozone. L'indicateur *smog* est exprimé en kg équivalent d'O₃.

5.2.4.1.4 Acidification

L'acidification a un impact plus régional que mondial qui affecte la qualité des sources et la santé des humains lorsque de fortes concentrations de SO₂ sont atteintes. L'acidification est le résultat de processus qui contribue à augmenter l'acidité de l'eau. Les pluies acides réduisent généralement l'alcalinité des lacs.

Le terme *pluie acide* est un terme général désignant un mélange de dépôts secs et humides (matériaux déposés) de l'atmosphère contenant des quantités supérieures à la normale d'acides nitrique et sulfurique. Les précurseurs, ou précurseurs chimiques, de la formation de pluies acides résultent à la fois de sources naturelles, telles que les volcans et la végétation en décomposition, et de sources synthétiques, principalement des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et d'oxydes d'azote (NO_x) résultant de la combustion de combustibles fossiles. Les pluies acides

se produisent lorsque ces gaz réagissent dans l'atmosphère avec de l'eau, de l'oxygène et d'autres produits chimiques pour former divers composés acides. Le résultat est une solution douce d'acide sulfurique et d'acide nitrique. Lorsque du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote sont libérés par les centrales électriques et d'autres sources, les vents dominants déplacent ces composés au-delà des frontières provinciales et nationales, parfois sur des centaines de kilomètres. Les émissions dans l'air et dans l'eau sont calculées sur la base de son équivalent en SO₂.

5.2.4.1.5 Eutrophisation

L'eutrophisation est la fertilisation des eaux de surface par des nutriments qui étaient auparavant rares. Lorsqu'un nutriment limitant ou auparavant limité est ajouté à un plan d'eau, cela entraîne la prolifération de la vie végétale photosynthétique aquatique. Cela peut déclencher toute une série de conséquences allant des mauvaises odeurs à la mort du poisson. Le résultat calculé est exprimé sur la base d'une masse équivalente d'azote (N).

5.2.5 **Logiciel de modélisation**

Le logiciel d'ACV SimaPro 9.0.0.48 de Pré Consultants est utilisé pour modéliser et calculer les impacts environnementaux potentiels des systèmes à l'étude (PRé Consultants, 2016).

5.2.6 **Interprétation des résultats**

L'interprétation des résultats est une phase qui comprend aussi bien l'identification des points chauds et des contributions aux impacts des intrants du système que la vérification d'hypothèses et de données d'inventaire. Il s'agit par exemple d'évaluer la sensibilité des résultats par rapport aux hypothèses et incertitudes des données, ou encore, de faire des ajustements cohérents sur la validité des hypothèses et des données en fonction de la sensibilité des résultats. L'interprétation permet d'analyser les résultats, d'en tirer des conclusions justifiées à lumière des limites pratiques de l'étude, et de formuler les recommandations claires qui permettent aux décideurs de prendre des décisions plus avisées (Jolliett, Saade-Sbeih, Shaked, Jolliet, & Crettaz, 2015).

5.2.7 **Limites de l'étude**

La fiabilité des résultats est influencée par les hypothèses et les données utilisées. La présente étude se base sur les principes des normes ISO 14040/44 (ISO, 2016), mais n'a pas été revue par un expert indépendant ou un panel afin d'en assurer la conformité. Toute analyse de cycle de vie (ACV) présente des limites qu'il importe de souligner. Les résultats s'appliquent à un cas d'étude pour un système constructif spécifique. La décision de se concentrer sur la construction à ossature légère a été motivée par le fait que ce système représente un défi de plus par rapport à la construction massive dont les éléments et les connexions sont généralement exposés et facilement démontables. Tout de même, les conclusions vont dans le sens d'études précédentes (Arrigoni, Zucchinelli, Collatina, & Dotelli, 2018) (Malmqvist, Rasmussen, Moncaster, & Birgisdottir, 2020).

La qualité des données d'inventaire développées ainsi que des données secondaires utilisées dans la modélisation sont une autre limite. Les inventaires développés pour les quatre scénarios étudiés sont le fruit d'une démarche minutieuse et exhaustive basée sur les plans du bâtiment étudié. Cela étant dit, ces données sont sujettes à un certain niveau d'incertitude comme toute estimation. Il n'y a pas de raison de croire qu'il s'agit d'une source d'erreur significative. De plus, la même méthode de calcul est utilisée pour chaque scénario faisant en sorte qu'il existe une certaine constance dans l'incertitude présente. Les données secondaires retenues pour la modélisation sont issues de bases de données reconnues et de DEP de produits non présents dans les bases de données. Ces

données sont aussi sujettes à un certain niveau d'incertitude. Les inventaires de processus et produits sont en constante évolution et des données de plus en plus précises seront disponibles dans le futur. Les processus de fin de vie en particulier mériteraient d'être étudiés en détail pour s'assurer de leur applicabilité dans le contexte du Québec. La même réflexion d'impose au niveau des données de coûts issues de la base de données RSMMeans. Les données qui ont été utilisées pour les produits innovants proviennent de représentants commerciaux et manufacturiers. Nous croyons qu'elles sont fiables et représentatives des coûts de construction pour le Québec. Or, il est pertinent de soulever l'origine différente de ces données; cela pourrait expliquer le coût inférieur de certains scénarios.

La connaissance de ces limites permet de contextualiser les résultats et conclusions découlant de cette étude.

5.3 Inventaires et données pour analyse de cycle de vie

5.3.1 Approche de collecte de données

La collecte de données est la partie la plus complexe et la plus longue d'une analyse de cycle de vie. Elle nécessite d'importantes ressources. Cette étude a eu recours à deux types de données : les données primaires et les données secondaires. Les données primaires sont constituées des données recueillies sur le terrain à travers des plans de construction, devis, visites sur site, ateliers de recherche (voir Annexe II), conceptions assistées par ordinateur (BIM et autres logiciels de conception), ainsi que les livrables fournis par les collaborateurs et experts impliqués dans ce projet. À défaut de données primaires, des données secondaires ont été utilisées et/ou développées. Contrairement aux données primaires, les données secondaires sont des données génériques et non spécifiques au projet. Ces données sont répertoriées dans des bases de données spécifiques et dans la littérature.

5.3.1.1 Collecte de données primaires

Les données primaires ont été recueillies avec la collaboration de firmes spécialisées telles que L2C experts-conseils, STGM Architectes et Structures RBR. Deux ateliers et webinaires de travail ont été organisés. Le premier atelier a permis de définir les scénarios à analyser. Le deuxième atelier a permis d'élaborer les stratégies de conception de chaque scénario ainsi que les contraintes techniques à respecter. Aux termes des ateliers, la firme L2C experts-conseils et la firme Structure RBR ont reçu des mandats relatifs à la structure du bâtiment et au dimensionnement des éléments structuraux. STGM Architectes a intégré et ajusté les plans de chaque scénario dans une maquette BIM. Les plans et la maquette BIM ont permis d'extraire les informations nécessaires au développement des inventaires des scénarios, c'est-à-dire les dimensions et le nombre d'éléments du bâtiment.

5.3.1.2 Collecte de données secondaires

La base de données *ecoinvent* a été utilisée comme source de données secondaires. La base de données *ecoinvent* est internationalement réputée pour sa fiabilité en termes de complétude, équivalence, disponibilité et adaptabilité géographique.

Outre la base de données *ecoinvent* v3.5 (Ecoinvent, s.d.), l'étude a eu recours à d'autres données secondaires issues d'autres types de bases de données telles que US LCI (National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2012), European Life Cycle Database (ELCD) v3.2 (European Commission, 2018) et des rapports ACV publiés par Athena Sustainable Materials Institute (Athena Sustainable Materials Institute, 2008) (Athena Sustainable Materials Institute, 2013).

Il est à noter que les données de certains produits innovants qui ne sont pas compris dans les bases de données ICV utilisées ont été tirées de déclarations environnementales de produits (DEPs) pour les modules du cycle de vie A1-A3 de sorte à être en accord avec la portée du projet. Pour ce faire, des flux d'émissions ont été attribués aux matériaux en question soit la membrane de toiture Sarnafil (Sika, 2016) et les panneaux de fibrogypse Fermacell (Fermacell, 2016).

Le panneau de gypse renforcé de fibre de verre de marque DensDeck™ a été modélisé autrement même s'il existe une DEP générique pour ce produit (Gypsum Association, 2016). En effet, les émissions associées à ce produit sont plusieurs centaines de fois supérieures aux émissions du produit comparable, soit le panneau de gypse conventionnel de type X tel que modélisé dans la base de données USLCI. Une décision a été prise de conserver les données d'inventaire pour le panneau de gypse provenant de la base de données USLCI pour le gypse tel qu'utilisé pour la modélisation du scénario de référence, et de poser l'hypothèse que les impacts environnementaux des panneaux DensDeck sont majorés par le même écart que celui qui sépare les DEPs des deux produits, soit environ 33%. L'utilisation des données provenant des DEPs pour ces deux produits aurait eu pour conséquence d'augmenter de manière importante la contribution de ces matériaux pour les scénarios les ayant dans leur inventaire.

5.3.2 Inventaires

Cette section présente l'inventaire des flux des systèmes analysés. Les inventaires permettent de faire le bilan des matières et d'énergie des flux entrants (intrants) et sortants (extrants) dans les frontières du système. Dans le cadre de cette étude relative à l'analyse de cycle de vie des bâtiments, les inventaires sont compilés et classés selon les modules définis par les normes européennes EN 15804/15978 (CEN, 2011) (Figure 8). Les frontières de système incluent l'étape de production des matériaux (modules A1-A3) et l'étape de fin de vie (modules C1-C4). Les étapes de construction (modules A4-A5) et d'opération (modules B1-B7) ont été exclues de l'étude (section 5.2.3).

5.3.2.1 Étape de production des matériaux (A1-A3)

La base de données *ecoinvent* a été utilisée comme base de données principale pour configurer, modéliser, adapter les processus unitaires et les inventaires associés à chaque matériau utilisé. D'autres bases de données telles que les bases de données USLCI et *Athena Sustainable Materials Institute (ASMI)* ont été utilisées pour compléter les inventaires de quelques matériaux pour lesquels les processus unitaires ne sont pas disponibles dans *ecoinvent*. Les énergies consommées relativement à l'étape de production de la plupart des matériaux ont été modélisées et ajustées en tenant compte du bouquet énergétique (*mix électrique*) de la province de Québec si ces matériaux sont actuellement produits au Québec.

L'estimation de la quantité des matériaux nécessaires à la construction des bâtiments a été faite à partir des plans structuraux et architecturaux. Le Tableau 6 présente le bilan d'inventaire des matériaux consommés par le bâtiment. Pour tous les scénarios analysés, les quantités présentées ne prennent pas en compte les rejets générés sur le chantier lors des travaux d'érection du bâtiment (p. ex. : bris ou débris issus des travaux de redimensionnement des panneaux de gypse ou panneaux de bois, etc.). Les quantités évaluées pour cette étape (A1-A3) sont donc en quelque sorte sous-estimées, car elles excluent les rejets associés à chaque type de matériaux. Cela correspond aux frontières définies des systèmes.

Tableau 6. Inventaire des matériaux par éléments

Composition des éléments du bâtiment	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
PLANCHERS	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Dalle de béton 125mm (voir structure)	326 707	326 707	326 707	326 707
Fouurrure de bois 19mm @ 405mm c/c (plancher/toit)	1 273	1 273	1 273	-1 273
Isolant rigide polystyrène extrudé 38mm	787	787	787	787
Laine insonorisante en fibre minérale 184mm (plancher/toit)	3 615	3 615	3 615	3 615
Laine insonorisante en fibre minérale 340mm (plancher/toit)	41 771	41 771	41 771	41 771
Membrane acoustique (voir devis)	2 150	2 150	2 150	-2 150
Membrane polyéthylène	459	459	459	459
Membrane sous-plancher (voir devis)	2 768	2 768	2 768	2 768
Panneau acoustique (voir devis)	15 675	15 675	15 675	2 161
Panneau de contreplaqué 16mm (plancher/toit)	54 721	54 721	54 721	54 721
Panneau de gypse 13mm type X (plancher/toit)	44 317	44 317	44 317	-44 317
Panneau de gypse 16mm type X (plancher/toit)	126 535	126 535	126 535	17 447
Pare-vapeur polyéthylène 0,15mm renforcie de fibre joints et percements scellés	154	154	154	154
Revêtement de plancher (voir tableau des finis)	42 437	42 437	42 437	42 437
Système de suspension avec isolateur et fouurrure AcoustiVibe	0	0	0	0
Tuile acoustique avec système de suspension ou gypse 13mm	4 657	4 657	4 657	4 657
Plancher en Fermacell - Fibre de bois 10 mm				6 880
Plancher en Fermacell - Fibre de gypse 20mm				115 975
BALCONS	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Bande de tapis de caoutchouc avec profil d'égouttement (19mm ép.)	9 765	9 765	9 765	9 765
Contreplaqué recouvert de fibre de verre sur toutes les faces	0	0	0	0
Fouurrure métallique 22mm posée à la verticale @405mm c/c (plancher/toit)	109	109	109	109
Membrane autocollante	663	663	663	663
Panneau de contreplaqué 13mm (plancher/toit)	3 862	3 862	3 862	3 862

Panneau de contreplaqué 16mm (plancher/toit)	4 753	4 753	4 753	4 753
Pare-air continu, joints scellés	33	33	33	33
Planche d'aluminium	2 139	2 139	2 139	2 139
MURS EXTÉRIEURS SIMPLES	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Barre en Z 42mm posée horizontalement @405 c/c	13 768	11 091	13 768	13 768
Barre en Z 77mm posée horizontalement @405 c/c	13 706	11 029	13 706	13 706
Carton-fibre 13mm	1 998	1 599	174	1 998
Colombage de bois 152mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	28 352	20 823	0	28 352
Fourrure de bois 19mm @ 405mm c/c (murs)	318	229	327	318
Fourrure métallique 22mm posée à la verticale @405mm c/c (murs)	1 608	1 419	1 608	1 608
Isolant semi-rigide 50mm sur barre en Z horizontal 42mm	9 598	8 348	9 598	9 598
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	336	336	0	336
Membrane autocollante	241	252	241	241
Membrane pare-air/vapeur	1 415	1 230	1 415	1 415
Mur de béton 305mm (voir structure)	67 943	67 943	67 943	67 943
Mur de béton 425mm (voir structure)	50 225	50 225	50 225	50 225
Panneau absorbeur en acier galvanisé à chaud	173	173	173	173
Panneau d'aluminium 25mm	415	415	415	415
Panneau d'aluminium 25mm ou planche d'aluminium (voir élévations)	9 995	8 611	9 995	9 995
Panneau de drainage sur tout la hauteur	96	96	96	96
Panneau de gypse 16mm type X (murs)	24 149	17 898	24 762	24 149
Panneau de gypse 16mm type X première couche (murs)	144	144	144	144
Panneau d'OSB (voir structure) avec percement de 13mm dia. à chaque 0.1m2, recouvert d'une membrane	131	131	0	131
Panneau d'OSB 11mm (murs)	90	90	0	90
Panneau solaire perforé à vitrage en polycarbonate (voir devis)	0	0	0	0
Pare-vapeur polyéthylène 0,06mm renforcie de fibre joints et percements scellés	1	1	0	1
Planche d'aluminium	417	455	417	417
Système d'espacement métallique @1200 c/c max.	0	0	0	0
Uréthane giclé RSI 2,99 min jusqu'à 601mm en dessous du niveau du sol (RSI 1,5 jusqu'au-dessus des semelles)	0	0	0	0

MURS DE REFEND EXTÉRIEURS	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Barre en Z 42mm posée horizontalement @405 c/c	1 574	5 213	1 574	1 574
Barre en Z 77mm posée horizontalement @405 c/c	1 574	5 213	1 574	1 574
Carton-fibre 13mm	0	0	0	0
Colombage de bois 152mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	4 497	0	0	4 497
Fouurrure de bois 19mm @ 405mm c/c (murs)	53	174	44	53
Fouurrure métallique 22mm posée à la verticale @405mm c/c (murs)	208	692	208	208
Isolant semi-rigide 50mm sur barre en Z horizontal 42mm	1 325	4 388	1 325	1 325
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	0	0	0	0
Membrane autocollante	0	0	0	0
Membrane pare-air/vapeur	196	651	196	196
Mur de béton 305mm (voir structure)	0	0	0	0
Mur de béton 425mm (voir structure)	0	0	0	0
Panneau absorbeur en acier galvanisé à chaud	0	0	0	0
Panneau d'aluminium 25mm	0	0	0	0
Panneau d'aluminium 25mm ou planche d'aluminium (voir élévations)	1 431	4 739	1 431	1 431
Panneau de drainage sur tout la hauteur	0	0	0	0
Panneau de gypse 16mm type X (murs)	3 676	12 175	3 063	3 676
Panneau de gypse 16mm type X première couche (murs)	0	0	0	0
Panneau d'OSB (voir structure) avec percement de 13mm dia. à chaque 0.1m2, recouvert d'une membrane	0	0	0	0
Panneau d'OSB 11mm (murs)	2 295	6 103	0	2 295
Panneau solaire perforé à vitrage en polycarbonate (voir devis)	0	0	0	0
Pare-vapeur polyéthylène 0,06mm renforcie de fibre joints et percements scellés	0	0	0	0
Planche d'aluminium	0	0	0	0
Système d'espacement métallique @1200 c/c max.	0	0	0	0
Uréthane giclé RSI 2,99 min jusqu'à 601mm en dessous du niveau du sol (RSI 1,5 jusqu'au-dessus des semelles)	0	0	0	0
MURS PRÉFABRIQUÉS				
	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Carton-fibre 13mm	0	0	1 823	0
Colombage de bois 152mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)				
Double lisse basse	0	0	34 958	0

Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	0	0	336	0
Panneau de contreplaqué 13mm (murs)	0	0	1 295	0
Panneau d'OSB (voir structure) avec percement de 13mm dia. à chaque 0.1m2, recouvert d'une membrane	0	0	131	0
Panneau d'OSB 13mm (murs)	0	0	2 713	0
Pare-vapeur polyéthylène 0,06mm renforcie de fibre joints et percements scellés	0	0	1	0
41 257				
TOITURE	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
50mm d'isolant de type polyisocyanurate	3 769	3 769	3 769	3 769
Fouurrure de bois 19mm @ 405mm c/c (plancher/toit)	288	288	288	288
Fouurrure métallique 22mm posée à la verticale @405mm c/c (plancher/toit)	58	58	58	58
Isolant en pente	109	109	109	109
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (plancher/toit)	27	27	27	27
Laine insonorisante en fibre minérale 184mm (plancher/toit)	375	375	375	375
Membrane élastomère de finition	5 012	5 012	5 012	0
Membrane élastomère de sous-couche	3 748	3 748	3 748	0
Panneau de contreplaqué 13mm (plancher/toit)	288	288	288	288
Panneau de contreplaqué 19mm (plancher/toit)	13 935	13 935	13 935	13 935
Panneau de gypse 16mm type X (plancher/toit)	13 157	13 157	13 157	13 157
Panneau de gypse 16mm type X première couche (plancher/toit)	13 157	13 157	13 157	13 157
Pare-vapeur autocollant	2 029	2 029	2 029	2 029
Pare-vapeur polyéthylène 0,06mm renforcie de fibre joints et percements scellés	1	1	1	1
Planche d'aluminium	160	160	160	160
Remplir toutes les cavités à 100% avec de la laine de fibre minérale	279	0	279	0
Tuile acoustique avec système de suspension ou gypse 13mm	736	736	736	736
Membrane Sarnafil 60 mil S327-15, Rhinobond induction welded system	0		0	1 895
1/4" Dens-Deck ^{MD} (Prime ^{MC}), mechanically attached	0		0	7 212
PARAPETS	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Barre en Z 42mm posée horizontalement @405 c/c	587	587	587	587
Colombage de bois 152mm @ 405mm c/c (1-2x6)	1 527	1 527	1 527	1 527

Fourrure métallique 22mm posée à la verticale @405mm c/c (murs)	71	71	71	71
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	399	399	399	399
Membrane autocollante	153	153	153	153
Membrane élastomère de finition	467	467	467	467
Membrane élastomère de sous-couche	350	350	350	350
Panneau d'aluminium 25mm	492	492	492	492
Panneau de contreplaqué 13mm (murs)	1 778	1 778	1 778	1 778

MURS INTÉRIEURS SIMPLES

	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Carton-fibre 13mm	1 145	637	1 145	1 145
Colombage de bois 152mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	32 043	19 849	32 043	32 043
Colombage de bois 152mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	4 998	4 998	4 998	4 998
Colombage de bois 92mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x4)	16 377	9 541	16 377	16 377
Colombage de bois 92mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x4)	4 722	3 278	4 722	4 722
Colombage en métal 152mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm	819	819	819	819
Colombage en métal 92mm @ 405mm c/c	37	37	37	37
Colombage en métal 92mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm	30 012	30 012	30 012	30 012
Colombage métallique de type CH 102mm @ 405mm c/c	374	374	374	374
Fourrure de bois 19mm @ 405mm c/c (murs)	68	68	68	68
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	8 831	6 332	8 831	8 831
Laine insonorisante en fibre minérale 92mm (murs)	7 109	3 930	7 109	7 109
Laine insonorisante en fibre minérale de 76mm (murs)	126	126	126	126
Panneau de contreplaqué 13mm (murs)	296	296	296	296
Panneau de gypse 13mm (murs)	75 483	75 483	75 483	13 261
Panneau de gypse 16mm type X (murs)	84 932	55 874	84 932	84 932
Panneau de gypse 16mm type X première couche (murs)	51 124	34 251	51 124	51 124
Panneau de gypse 25mm type X (murs)	921	921	921	921
Panneau d'OSB 11mm (murs)	22 654	17 067	22 654	22 654
Panneau d'OSB 16mm (murs)	16 914	9 718	16 914	16 914
Panneau de MDF NuGreen MR50 15mm	0		0	88 421

MURS DE REFEND INTÉRIEURS

	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Carton-fibre 13mm	0	599	0	0

Colombage de bois 152mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	0	19 858	0	0
Colombage de bois 152mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x6)	0	8 274	0	0
Colombage de bois 92mm @ 305mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x4)	0	0	0	0
Colombage de bois 92mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm (1-2x4)	0	1 444	0	0
Colombage en métal 152mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm	0	0	0	0
Colombage en métal 92mm @ 405mm c/c	0	0	0	0
Colombage en métal 92mm @ 405mm c/c & entremise au 1200mm	0	0	0	0
Colombage métallique de type CH 102mm @ 405mm c/c	0	0	0	0
Fouurrure de bois 19mm @ 405mm c/c (murs)	0	0	0	0
Laine insonorisante en fibre minérale 140mm (murs)	0	4 771	0	0
Laine insonorisante en fibre minérale 92mm (murs)	0	2 764	0	0
Laine insonorisante en fibre minérale de 76mm (murs)	0	0	0	0
Panneau de contreplaqué 13mm (murs)	0	0	0	0
Panneau de gypse 13mm (murs)	0	0	0	0
Panneau de gypse 16mm type X (murs)	0	33 507	0	0
Panneau de gypse 16mm type X première couche (murs)	0	19 252	0	0
Panneau de gypse 25mm type X (murs)	0	0	0	0
Panneau d'OSB 11mm (murs)	0	11 105	0	0
Panneau d'OSB 16mm (murs)	0	9 074	0	0
Panneau de MDF NuGreen MR50 15mm	0		0	0

ÉLÉMENTS STRUCTURAUX	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)	Masse (kg)
Solive de bois 184mm (voir structure)	5 773	5 773	5 773	5 773
Poutrelle de bois plancher (Ajourée 302mm haut.)	60 630	5 424	60 630	55 206
HSS balcons	0	0	0	29 616
Structure de bois avec pente (Ajourée 619mm au point le plus haut)	7 390	581	7 390	7 390
Poutrelle de bois toiture (Ajourée 619mm haut.)	344	350	344	344
C1 Versalam 1.8E	3 123	3 123	3 123	3 123
C2 Versalam 1.8E	2 667	2 667	2 667	2 667
C46 MSR1650 Fb1.5E	307	307	307	307
C48 MSR1650 Fb1.5E	6 554	6 554	6 554	6 554
C63 MSR1650 Fb1.5E	3 504	3 504	3 504	3 504
C65 MSR1650 Fb1.5E	2 215	2 215	2 215	2 215

C66 MSR1650 Fb1.5E	5 800	5 800	5 800	5 800
C68 MSR1650 Fb1.5E	3 866	3 866	3 866	3 866
T C63 MSR1650 Fb.5E	16 916	16 916	16 916	16 916
P32x302 Lamellé-collé	700	700	700	700
P44x302 Lamellé-collé	6 151	6 151	6 151	6 151
P89x302 Lamellé-collé	1 197	1 197	1 197	1 197
P133x302 Lamellé-collé	13 705	13 705	13 705	13 705
ML26Z	7	7	7	7
IUS1.81/11.88	89	89	89	89
HGUS5_50/10	7	7	7	7
ABU66Z	37	37	37	37
HUC66	1	1	1	1
HUC610	1	1	1	1
HUC410	19	19	19	19
H3	22	22	22	22
HL55	30	30	30	30
HUCQ610	103	103	103	103
3-2x6	0	6 214	1 660	0
3-2x6	0	6 214	0	0
4-2x6	0	1 473	0	0
5-2x6	0	12 773	0	0
6-2x6	0	690	0	0

5.3.2.2 Analyse de l'inventaire et agrégation des données

Le Tableau 7 présente l'inventaire agrégé des matériaux. Une somme des quantités par type ou famille de matériaux a été faite à partir du **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Certains matériaux sont dissociés en fonction de leur application. Par exemple, le bois de structure a été dissocié du bois incorporé dans l'enveloppe du bâtiment et d'autres éléments en bois (p. ex. : bois d'ingénierie, bois de construction, contreplaqué, panneaux OSB et panneaux MDF). Le

Matériau	Scénario référence	Scénario adaptabilité		Scénario préfabrication	
	Masse (kg)	Masse (kg)	Δ%	Masse (kg)	Δ%
Aluminium	15 048	17 011	13%	15 048	0%
Membrane bitumineuse	12 759	12 770	0%	12 759	0%
Cellulose	3142	2835	-10%	3142	0%
Béton	444 875	444 875	0%	444 875	0%
Liège (acoustique)	20 593	20 593	0%	20 593	0%
DensDeck 1/4"	0	0		0	
Fermacell - Fibre de bois 10 mm	0	0		0	
Fermacell - Fibre de gypse 20mm	0	0		0	
Membrane Sarnafil 60 mm	0	0		0	
Panneau de MDF NuGreen MR50 15mm	0	0		0	
Laine de roche	66 606	64 447	-3%	66 606	0%
Bois d'ingénierie	66 706	66 706	0%	66 706	0%
Gypse standard	125 192	125 192	0%	125 192	0%
Gypse type X	317 796	326 873	3%	317 796	0%
Laine de verre	10 923	12 736	17%	10 923	0%
<i>Oriented strand board (OSB)</i>	42 085	53 289	27%	42 412	1%
Membrane polyéthylène (PET)	2260	2529	12%	2260	0%
Bois de construction	108 023	125 692	16%	111 793	3%
Contreplaqué	79 634	79 634	0%	80 929	2%
Isolant rigide de polystyrène extrudé	896	896	0%	896	0%
Acier	64 993	67 215	3%	64 993	0%
Poutrelle en I balcons	5424	5424	0%	5424	0%
Poutrelle plancher	55 206	55 206	0%	55 206	0%
TOTAL	1 442 163	1 483 923		1 447 554	

Note : Delta% (Δ%) représente la différence entre la quantité d'un matériau X utilisé dans les scénarios alternatifs par rapport au scénario de référence.

Tableau 8 présente la liste des processus utilisés pour modéliser les impacts.

L'analyse de l'inventaire montre une faible variation des quantités de matériaux entre le scénario de référence et le scénario préfabrication. En effet, l'usage des murs préfabriqués entraîne une légère augmentation des quantités de matériaux bois (contreplaqué, OSB et bois de construction). Pour le scénario d'adaptabilité, la nouvelle trame structurale et la diminution du nombre de murs de refend entraîne une diminution des quantités du bois de construction et de carton fibre. Cependant, les nouvelles compositions des murs de refend, les portées de la trame et la hauteur des solives (variation de la hauteur *plafond-plancher*) entraînent une augmentation des quantités de certains matériaux (p. ex. : OSB, aluminium, acier, etc.). Quant au scénario matériaux, la variation des quantités comparativement au scénario de référence est très importante. Le but du scénario étant de réduire considérablement la quantité de gypse dans le bâtiment, les différentes stratégies adoptées et l'usage des matériaux alternatifs ont entraîné une élimination complète du gypse standard, une réduction d'environ 34 % du gypse de type X et une réduction de 87 % de la quantité des panneaux acoustiques. Le choix d'une nouvelle membrane de toiture en remplacement de la membrane élastomère a entraîné une réduction de 69 % de la membrane bitumineuse.

Tableau 7. Inventaire agrégé des matériaux

Matériau	Scénario référence	Scénario adaptabilité		Scénario préfabrication		Scénario matériaux	
	Masse (kg)	Masse (kg)	Δ%	Masse (kg)	Δ%	Masse (kg)	Δ%
Aluminium	15 048	17 011	13%	15 048	0%	15 048	0%
Membrane bitumineuse	12 759	12 770	0%	12 759	0%	3999	-69%
Cellulose	3142	2835	-10%	3142	0%	3142	0%
Béton	444 875	444 875	0%	444 875	0%	444 875	0%
Liège (acoustique)	20 593	20 593	0%	20 593	0%	2779	-87%
DensDeck 1/4"	0	0		0		7212	
Fermacell - Fibre de bois 10 mm	0	0		0		6880	
Fermacell - Fibre de gypse 20mm	0	0		0		115 975	
Membrane Sarnafil 60 mm	0	0		0		1895	
Panneau de MDF NuGreen MR50 15mm	0	0		0		88 421	
Laine de roche	66 606	64 447	-3%	66 606	0%	62 589	-6%
Bois d'ingénierie	66 706	66 706	0%	66 706	0%	66 706	0%
Gypse standard	125 192	125 192	0%	125 192	0%	0	
Gypse type X	317 796	326 873	3%	317 796	0%	208 707	-34%
Laine de verre	10 923	12 736	17%	10 923	0%	10 923	0%
<i>Oriented strand board (OSB)</i>	42 085	53 289	27%	42 412	1%	42 085	0%
Membrane polyéthylène (PET)	2260	2529	12%	2260	0%	2260	0%
Bois de construction	108 023	125 692	16%	111 793	3%	108 023	0%
Contreplaqué	79 634	79 634	0%	80 929	2%	79 634	0%
Isolant rigide de polystyrène extrudé	896	896	0%	896	0%	896	0%
Acier	64 993	67 215	3%	64 993	0%	94 609	46%
Poutrelle en I balcon	5424	5424	0%	5424	0%	0	-100%
Poutrelle plancher	55 206	55 206	0%	55 206	0%	55 206	0%
TOTAL	1 442 163	1 483 923		1 447 554		1 421 866	

Note : Delta% (Δ%) représente la différence entre la quantité d'un matériau X utilisé dans les scénarios alternatifs par rapport au scénario de référence.

Tableau 8. Liste des processus utilisés dans SimaPro

Processus	Matériau
Aluminium alloy, ALi (CA-QC) production	Aluminium
Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant {CA-QC} production Alloc Def, U	Membrane bitumineuse
Carton cellulose (Cellulose fibre, inclusive blowing in {RoW}) production APOS, U)	Cellulose
Concrete, 30-32MPa (CA-QC) concrete production	Béton
Cork slab {RoW} production APOS, U_PAL6	Liège (acoustique)
Panneau gypse recouvert de fibre de verre	DensDeck 1/4"
EPD isolant sous fibrogypse	Fermacell - Fibre de bois 10 mm
EPD fibrogypse	Fermacell - Fibre de gypse 20mm
EPD membrane Sika	Membrane Sarnafil 60 mm
MDF Medium density fibreboard {RoW} medium density fibre board production, uncoated APOS, U_DfD	Panneau de MDF NuGreen MR50 15mm
Stone wool, packed {RoW} stone wool production, packed APOS, U_Arbora	Laine de roche
Glued laminated timber, for indoor use {CA-QC} production Alloc Def, U	Bois d'ingénierie
Gypsum wallboard product, regular, 0.5 inch (12.7 mm)/m2/RNA	Gypse standard
Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m2/RNA	Gypse type X
Glass wool mat {CA-QC} production Alloc Def, U	Laine de verre
Oriented strand board {CA-QC} production Alloc Def, U	<i>Oriented strand board (OSB)</i>
PET film (production only) E	Membrane polyéthylène (PET)
Pine wood, timber, production mix, at saw mill, 20% water content DE S	Bois de construction
Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	Contreplaqué
Polystyrene, extruded (CA-QC) polystyrene production,	Isolant rigide de polystyrène extrudé
Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production,	Acier
Joist, engineered wood {CA-QC} engineered wood joist production Cut-off, U	Poutrelle en I balcons
Joist, engineered wood {CA-QC} engineered wood joist production Cut-off, U	Poutrelle plancher

5.3.2.3 Étape de fin de vie (C1-C4)

5.3.2.3.1 Étape de démolition (module C1)

L'inventaire du cycle de vie qui caractérise ce module s'articule autour de deux informations essentielles, à savoir l'énergie consommée par la machinerie lors de la démolition, et la quantité totale des matériaux générés lors de la démolition. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les quantités totales de matériaux présentes dans les bâtiments et celles des matériaux traités au centre de tri pour chaque scénario. Dans le scénario de référence et le scénario adaptabilité, tous les matériaux présents dans le bâtiment aboutissent au centre de tri. Ce n'est pas le cas des deux autres scénarios pour lesquels une partie des matériaux, respectivement 2,9 % et 6,4 %, sont réutilisés (Tableau 9).

Tableau 9. Poids total des matériaux traités en fin de vie

	Unité	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
Matériaux entrant dans la construction	Tonne	1442,2	1483,9	1447,6	1419,1
Murs préfabriqués (réemploi)	Tonne	0,0	0,0	41,3	0,0
Balcons amovibles	Tonne	0,0	0,0	0,0	29,6
MDF (réemploi)	Tonne	0,0	0,0	0,0	88,4
Sarnafil (réemploi)	Tonne	0,0	0,0	0,0	1,9
Matériaux entrant au centre de tri	Tonne	1442,2	1483,9	1406,3	1328,8
% réemploi	%	0,0 %	0,0 %	2,9 %	6,4 %

Il est pertinent de souligner qu'une fois les matériaux traités au centre de tri, une partie ira au recyclage, une autre à la valorisation énergétique et finalement une dernière à l'enfouissement (ou utilisée comme recouvrement journalier). Les détails sont présentés au Tableau 14.

La quantité d'énergie consommée lors de la démolition a été estimée en se basant sur un rapport réalisé pour *Athena Sustainable Materials Institute* (ASMI) par Gordon Engineering (Gordon Engineering, 1997) (Doka, 2003). L'étude a analysé la démolition de trois scénarios de bâtiments de trois étages chacun, dont le premier a une structure en acier, le second une structure en bois et le troisième une structure en béton armé. L'étude inclut l'énergie consommée par la machinerie, la main-d'œuvre et les équipements sous forme de carburant et d'électricité. La consommation moyenne d'énergie par surface de structure en bois démolie a été utilisée. Elle s'élève à 140,9 MJ/m². Elle est modélisée comme étant du diesel alimentant de la machinerie sur le chantier. Le bâtiment actuel ainsi que les scénarios alternatifs possèdent une superficie totale de plancher de 5052 m². L'énergie de démolition des scénarios est présentée dans le tableau ci-dessous. L'énergie des scénarios préfabrication et matériaux a été réduite de 2,4 % et 7,9 % respectivement en fonction des proportions de matériaux envoyés au centre de tri relativement au scénario de référence.

Tableau 10. Énergie de démolition (module C1)

Étape	Unité	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
Énergie de démolition	MJ	711 675	711 675	693 976	655 745

5.3.2.3.2 Transport des matériaux vers les centres de tri (C2)

Les débris des matériaux de démolition en vrac sont acheminés vers un centre de tri spécialisé, excepté les murs préfabriqués qui sont récupérés et acheminés ailleurs pour une réutilisation future. Il en est de même pour les panneaux de MDF et la membrane de toiture du scénario matériaux. Une distance de transport de 22 km (de Pointe-aux-Lièvres vers Charlesbourg) a été considérée pour le transport au centre de tri le plus près. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente l'inventaire associé au transport de ces matières.

Tableau 11. Transport vers le centre de tri

Étape	Unité	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
Quantité matériaux en vrac	tonne	1442	1484	1406	1329
Distance de transport	km	22	22	22	22
Transport enfouissement (C2)	t.km	31 295	32 201	30 517	28 835

5.3.2.3.3 Tri des matières résiduelles (C3)

Ce module d'information permet de quantifier l'énergie électrique consommée par les équipements mis en place pour faciliter le triage. La base de données *ecoinvent* fournit une valeur moyenne de 3,7 kWh par tonne de matériaux en vrac acheminés au centre de tri (Doka, Part V: Building material disposal in Waste treatment, 2003). Cette moyenne reflète l'énergie consommée par le concasseur, le broyeur hydraulique, les tamis, les convoyeurs et autres équipements. Certains matériaux sont triés en amont avant que le reste ne soit acheminé au broyeur. Pour ces matériaux, la consommation électrique est estimée à 2,2 kWh/t de matériaux en vrac. Cette énergie est celle consommée uniquement par les convoyeurs (Doka, Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services (Ecoinvent), 2003).

Mis à part la consommation électrique, le centre de tri consomme du carburant pour charger, décharger et déplacer les matériaux à trier. Les centres de tri utilisent des chargeurs compacts rigides (*skid-steer loaders*). La consommation moyenne du carburant diesel est estimée à 3,7 MJ/t de matériaux en vrac. Le Tableau 12 présente l'énergie consommée au centre du tri durant le tri.

Tableau 12. Énergies de triage au centre de tri

Étape	Unité	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
Broyeur	kWh	5 336	5 491	5 203	4 917
Convoyeur	kWh	3 173	3 265	3 094	2 923
Chargeur	MJ	5 336	5 491	5 203	4 917

5.3.2.3.4 Gestion et élimination (C4)

Ce module quantifie la production du centre de tri en fonction des matières résiduelles prises en charge par ce dernier. La production est répartie en matériaux aptes au réemploi, en matériaux recyclés ainsi qu'en matériaux envoyés vers les sites d'enfouissement (ou utilisés comme recouvrement journalier) ou les sites d'incinération.

Il est difficile d'estimer avec précision la production et le rendement matière des centres de tri. Des données publiées par Recyc-Québec en 2020, permettent de brosser un portrait approximatif des quantités de matières résiduelles provenant du secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition (CRD) traitées en 2018 au Québec en posant des hypothèses sur la composition des matières entrantes. Les quantités évaluées sont présentées au Tableau 13. La colonne *Éliminé pré* fait référence aux matières qui ne sont pas acheminées aux centres de tri. La colonne *Éliminé post* fait référence aux matières éliminées à la sortie du centre de tri.

Tableau 13. Estimation du traitement des matières résiduelles issues du secteur CRD en 2018 au Québec (en tonnes)

	Généré	Éliminé pré	Recyclé	Valorisé	Total	Recouvrement	Éliminé post
Agrégats	238,880	60,250	147,000	0	147,000	21,000	22,000
Bois et résidus	1,194,400	302,032	84,000	211,000	295,000	148,000	445,000
Bardeaux	238,880	60,250	2,000	29,000	31,000	43,000	107,000
Gypse	298,600	120,500	6,000	0	6,000	11,000	148,000
Carton/fibres	59,720	34,429	21,000	0	21,000	3,000	4,000
Métaux	89,580	28,169	45,000	0	45,000	0	16,000
Autres	865,940	602,500	5,000	8,000	13,000	152,000	103,000
Total	2,986,000	1,205,000	310,000	248,000	558,000	378,000	845,000

Sources : (Recyc-Québec, 2020) (Recyc-Québec, 2020) (Recyc-Québec, 2013) (Perry & VanderPol, 2014)

Le destin des matières traitées au centre de tri est évalué tel que présenté au Tableau 14. Ces proportions ont été appliquées aux quantités de matériaux comprises dans chaque scénario une fois que les éléments réutilisables (murs préfabriqués) ou recyclables (MDF et membrane toiture) ont été retirés.

Tableau 14. Rendement estimé du centre de tri par matériau

	Recyclé	Valorisé	Recouvrement	Éliminé post centre de tri
Agrégats	77 %	0 %	11 %	12 %
Bois et résidus	9 %	24 %	17 %	50 %
Bardeaux	1 %	16 %	24 %	59 %
Gypse	4 %	0 %	7 %	90 %
Carton/fibres	75 %	0 %	11 %	14 %
Métaux	74 %	0 %	0 %	26 %
Autres (plastique, verre)	2 %	3 %	57 %	38 %

Appliquées au contexte de cette étude de cas, ces proportions permettent d'estimer les quantités présentées au Tableau 15.

Deux des trois scénarios permettent de diminuer la quantité de matières envoyées vers le centre de tri. Le scénario adaptabilité est le seul engendrant une augmentation des matières sur la base d'un bâtiment (cycle de 60 ans). Or, il est important de garder à l'esprit que le bâtiment adaptable durera 120 ans et n'aura qu'une démolition, contrairement au bâtiment de référence qui ne durera que 60 ans et sera démoli deux fois. Ainsi, une comparaison sur la base de l'unité fonctionnelle de 120 ans permet au bâtiment adaptable de réduire la quantité de matières résiduelles envoyées au centre de tri de manière importante. En effet, le bâtiment de référence génèrerait deux fois 1442 tonnes pour un total de 2884 tonnes de matières par opposition à 1484 tonnes pour le bâtiment adaptable (Sc1), soit une réduction de 49 %.

Le scénario préfabrication réduit quant à lui de 36 tonnes la quantité de matières reçue par les centres de tri. Le recyclage est réduit de trois tonnes et l'enfouissement de 24 tonnes. La quantité de matière valorisée pour son énergie est réduite de huit tonnes. Finalement, le scénario matériaux réduit de manière significative la quantité de matériaux allant aux centres de tri (-113 tonnes) d'une part, et à l'enfouissement (-108 tonnes) d'autre part. Le matériau pour lequel il y a la plus grande réduction de l'enfouissement est le gypse qui est remplacé par du Fermacell. Cette réduction est d'autant plus prononcée qu'une couche de 20 mm de fibrogypse permet de remplacer deux couches de gypse conventionnel.

Tableau 15. Distribution massique du vrac au sortir du centre de tri par scénario (tonnes)

Scénario Référence (ScRef)

	Recyclage	Valorisation énergétique	Recouvrement	Enfouissement
Agrégats	344	0	49	52
Bois et résidus	36	90	63	189
Bardeaux	0	2	3	8
Gypse	16	0	30	397
Carton/fibres	2	0	0	0
Métaux	59	0	0	21
Autres (plastique, verre)	2	2	46	31
Total	459	94	191	698
Répartition	31,8 %	6,5 %	13,2 %	48,4 %

*Note : Dans la comparaison avec le scénario adaptabilité, ces volumes sont doublés, i.e. deux démolitions en 120 ans.

61,6 %

Scénario Adaptabilité (Sc1)

	Recyclage	Valorisation énergétique	Recouvrement	Enfouissement
Agrégats	344	0	49	52
Bois et résidus	38	97	68	204
Bardeaux	0	2	3	8
Gypse	16	0	30	405
Carton/fibres	2	0	0	0
Métaux	62	0	0	22
Autres (plastique, verre)	2	2	46	31
Total	465	101	196	722
Répartition	31,3 %	6,8 %	13,2 %	48,6 %

61,9 %

Scénario Préfabrication (Sc2)

	Recyclage	Valorisation énergétique	Recouvrement	Enfouissement
Agrégats	344	0	49	52
Bois et résidus	32	81	57	171
Bardeaux	0	2	3	8
Gypse	16	0	30	397
Carton/fibres	2	0	0	0
Métaux	59	0	0	21
Autres (plastique, verre)	1	2	46	31
Total	456	86	185	680
Répartition	32,4 %	6,1 %	13,1 %	48,4 %

61,5 %

Scénario Matériaux (Sc3)

	Recyclage	Valorisation énergétique	Recouvrement	Enfouissement
Agrégats	344	0	49	52
Bois et résidus	34	85	60	180
Bardeaux	0	1	1	2
Gypse	12	0	22	298
Carton/fibres	2	0	0	0
Métaux	81	0	0	29
Autres (plastique, verre)	1	2	43	29
Total	475	88	176	590
Répartition	35,7 %	6,6 %	13,2 %	44,4 %

57,6 %

Les matières résiduelles destinées à l'enfouissement sont acheminées vers le lieu d'enfouissement technique (LET) de Saint-Joachim situé à environ 50 km du centre de tri. Les besoins de transport de chaque scénario pour cette étape de cycle de vie sont présentés au Tableau 16.

Tableau 16. Transport des matières résiduelles vers l'enfouissement

Étape	Unité	Scénario de référence (ScRef)	Scénario adaptabilité (Sc1)	Scénario préfabrication (Sc2)	Scénario matériaux (Sc3)
Déchets finaux vers lieu d'enfouissement (C4)	tonne	889	918	865	766
Distance de transport	km	50	50	50	50
Transport enfouissement (C4)	t.km	44 000	45 435	42 810	37 906

La modélisation de la fin de vie des matières allant à la valorisation énergétique et à l'enfouissement a été faite par agrégation de catégories de matériaux. Cinq processus sont utilisés pour modéliser la fin de vie (Tableau 17). Les matériaux autres incluent les déchets principalement inorganiques sous forme de plastique, métal, verre, bardeaux et agrégats. Les flux massiques de chaque matière sont présentés au Tableau 18.

Tableau 17. Processus de modélisation de fin de vie

Élément	Processus SimaPro
Valorisation énergétique bois	Waste wood, untreated {RoW} heat production, untreated waste wood, at furnace 1000-5000 kW APOS, U
Enfouissement bois	Waste wood, untreated {GLO} treatment of waste wood, untreated, open dump, dry infiltration class (100mm) APOS, U
Enfouissement gypse	Waste gypsum {RoW} treatment of waste gypsum, inert material landfill APOS, U
Valorisation énergétique autres	Municipal solid waste {CA-QC} treatment of municipal solid waste, incineration APOS, U
Enfouissement autres	Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill APOS, U

Tableau 18. Flux de matières en fin de vie

ScRef : Scénario référence (kg)

	Valorisation	Enfouissement
Bois	89 739	252 206
Gypse	0	426 879
Autres	4453	209 807
Sous-total	94 192	888 893
Total		983 085

Sc1 : Scénario adaptabilité (kg)

	Valorisation	Enfouissement
Bois	96 600	271 487
Gypse	0	435 626
Autres	4452	210 764
Sous-total	101 052	917 877
Total		1 018 930

Sc2 : Scénario
préfabrication (kg)

	Valorisation	Enfouissement
Bois	81 297	228 480
Gypse	0	426 879
Autres	4443	209 487
Sous-total	85 740	864 846
Total		950 586

Sc3 : Scénario
matériaux (kg)

	Valorisation	Enfouissement
Bois	85 205	239 462
Gypse	0	319 825
Autres	2929	206 494
Sous-total	88 134	765 781
Total		853 915

6. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

La présente section traite des résultats de l'ACV (sections 6.1 et 6.1.2) ainsi que des coûts de construction (section 6.2) pour chaque scénario.

6.1 Analyse d'impacts environnementaux

Les interprétations de cette étude mettent l'accent sur les indicateurs recommandés par la règle de catégorie de produits (de l'anglais *Product category rules - PCR*) pour les produits de construction et les produits forestiers (ISO, 2017) (UL, 2019). Étant donné que le programme de développement de connaissances dans lequel s'inscrit cette étude met l'accent sur les changements climatiques et les matériaux à faible empreinte carbone, l'interprétation des résultats sera principalement effectuée autour de l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique. Les autres indicateurs retenus sont l'appauvrissement de la couche d'ozone, la formation de smog photochimique, l'acidification et l'eutrophisation (voir section 5.2.4).

L'analyse d'impact permet d'effectuer une analyse comparative d'un scénario donné par rapport à un autre ainsi qu'une analyse de la contribution par étape de cycle de vie (l'étape de production et l'étape de fin de vie). La présentation des résultats est faite selon les deux systèmes de frontières (sur 60 ans et sur 120 ans).

6.1.1 Analyse d'impacts des scénarios sur 60 ans

6.1.1.1 Analyse comparative des impacts totaux des scénarios

Les impacts totaux des scénarios sont présentés à la Figure 11. Les résultats montrent que les impacts du scénario préfabrication sont similaires aux impacts du scénario de référence, et ce, pour toutes les cinq catégories d'impacts environnementaux. Le scénario matériaux présente une faible amélioration des performances environnementales comparativement au scénario de référence. Au niveau des émissions de GES, l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique présente une réduction de 9 %. Cela représente, en valeurs absolues, une réduction de 59 t éq. CO₂ par rapport au scénario de référence.

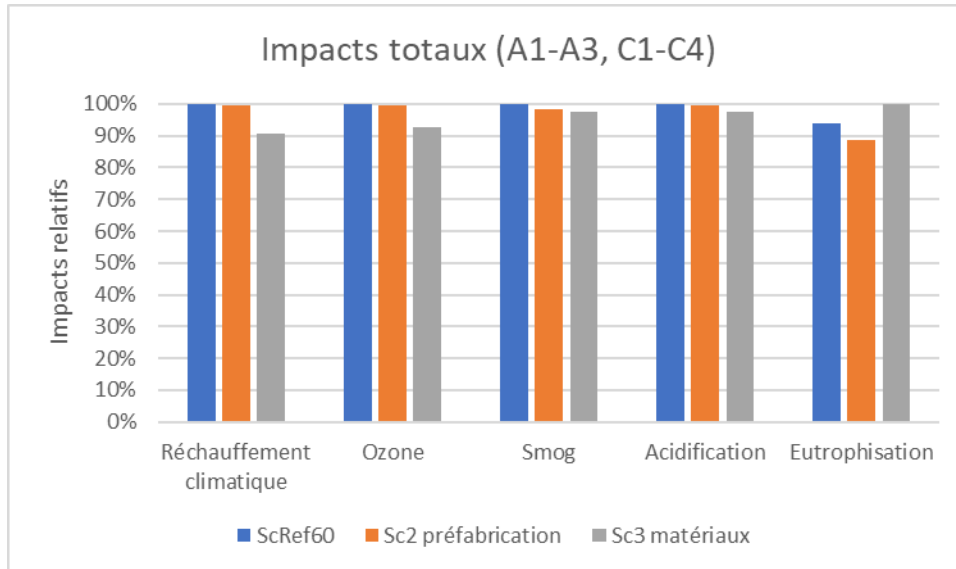


Figure 11. Impacts totaux des scénarios

6.1.1.2 Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie

L'étape de production est celle qui contribue le plus aux impacts en GES des bâtiments tous scénarios confondus. L'étape de fin de vie explique de 16 % à 17 % des impacts en GES des bâtiments pour les frontières du système choisies. Les émissions associées à l'étape de fin de vie sont fonction de la quantité du tonnage acheminé au centre de tri et à l'enfouissement. Il est pertinent de souligner que la production évitée d'énergie et de fabrication de produits issue du réemploi, du recyclage ou de la valorisation énergétique (module D) est hors de la portée de l'analyse. Elle sera abordée dans la section 7.

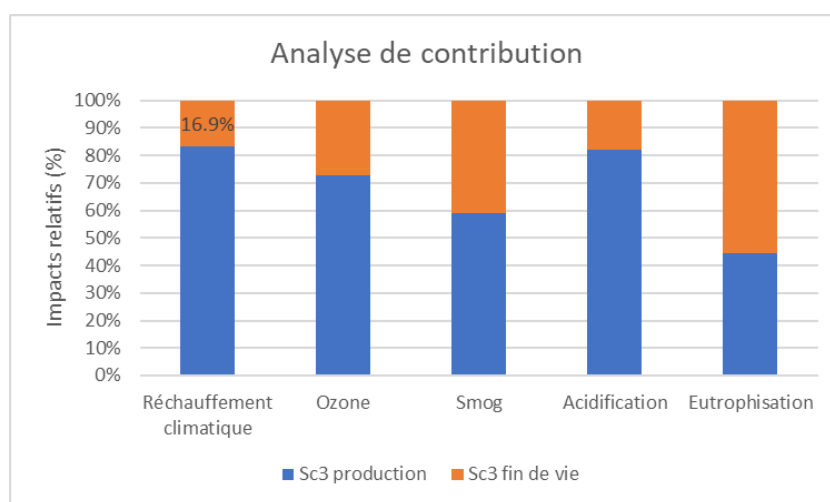
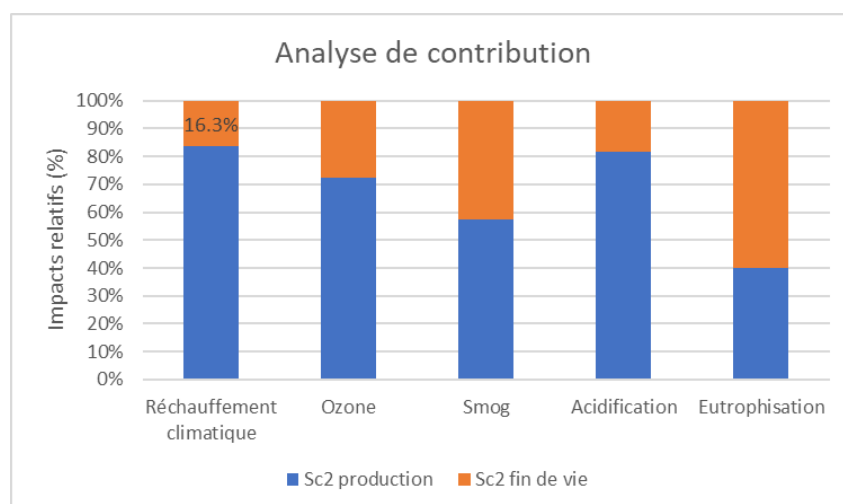
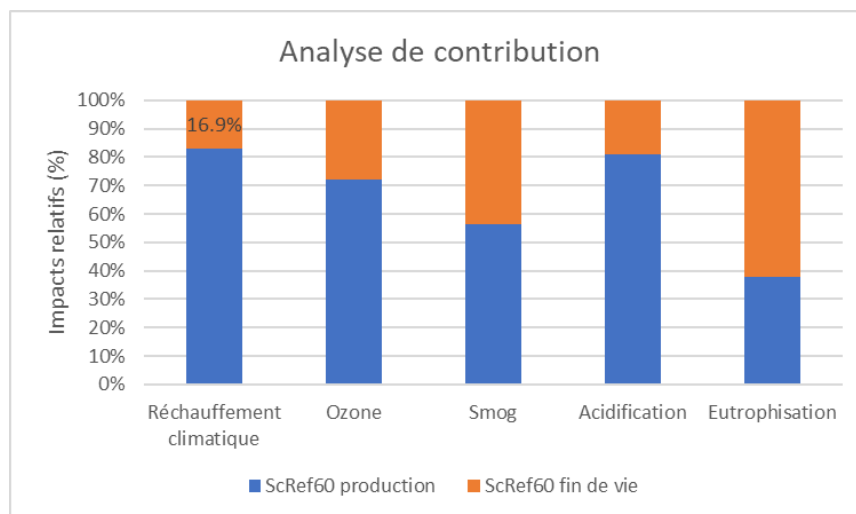


Figure 12. Analyse de contribution aux impacts des étapes du cycle de vie

6.1.1.3 Analyse de contribution des matériaux à l'étape de production (A1-A3)

L'analyse de contribution des matériaux est présentée en détail au Tableau 19. Elle montre que le scénario de référence a des émissions de production estimées à 522 tonnes éq. CO₂. Le gypse est le plus gros contributeur aux impacts en GES du scénario de référence représentant plus du quart des émissions de GES intrinsèques (26 %). Les deuxième et troisième matériaux contribuant le plus aux impacts sont respectivement la laine de roche (17 %) et le béton (12 %). L'acier contribue à 9 % des émissions de GES des matériaux entrant dans le bâtiment.

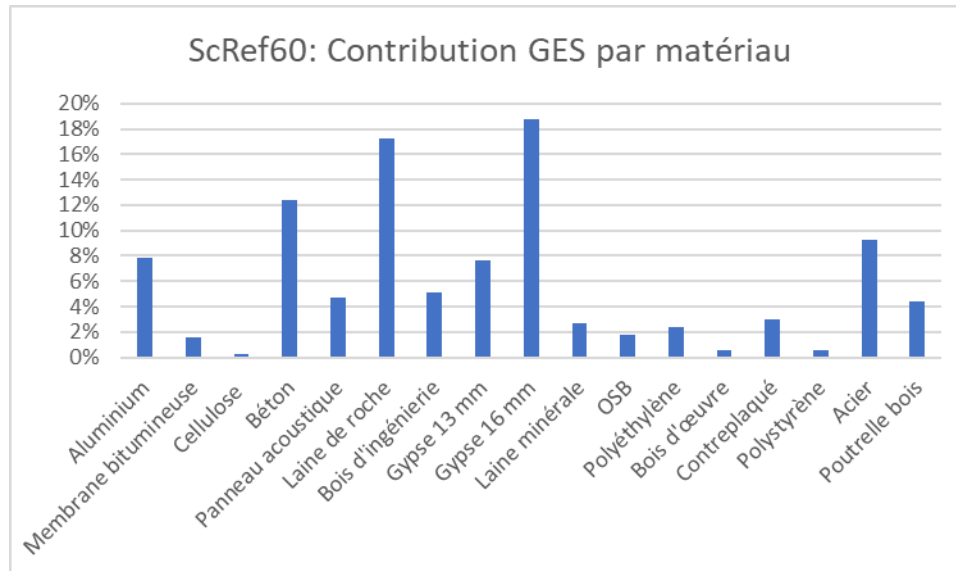


Figure 13. Analyse de contribution de l'étape production du scénario de référence par matériau

La même tendance des niveaux de contribution est observée pour le scénario préfabrication (Figure 14) dont les émissions intrinsèques de GES sont évaluées à 523 tonnes éq. CO₂. Cette similitude dans l'analyse de contribution s'explique par le fait que le scénario de référence et le scénario préfabrication ne diffèrent qu'au niveau des murs extérieurs qui représentent une assez faible proportion de l'ensemble des matériaux compris dans le bâtiment.

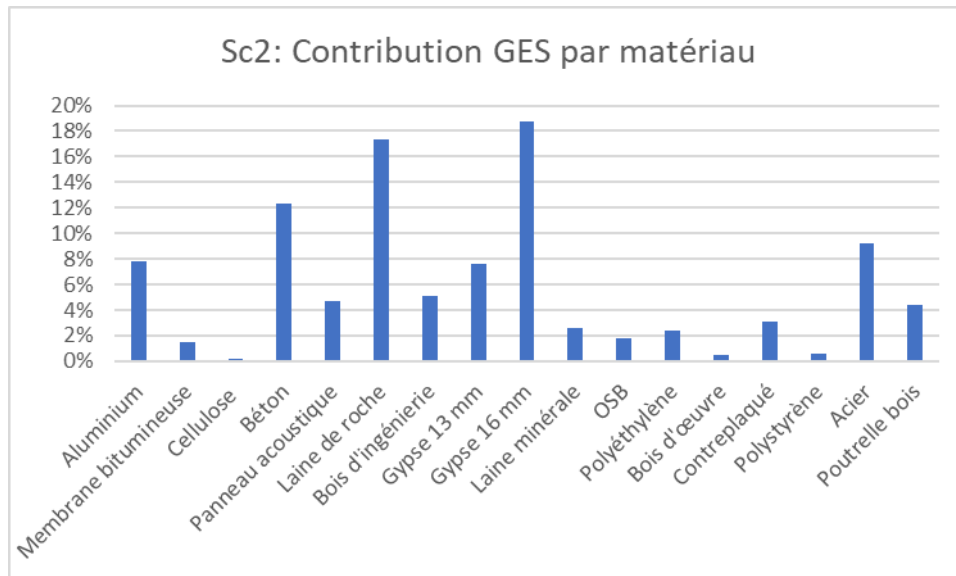


Figure 14. Analyse de contribution de l'étape production du scénario préfabrication par matériau

Quant au scénario matériaux, le niveau de contribution du gypse (14 %) est relégué au quatrième rang. Le gypse est en grande partie remplacé par du MDF qui représente moins de 6 % des émissions totales attribuables aux matériaux. Le Fermacell, qui lui aussi remplace le gypse, a des émissions équivalentes à 1 % des émissions du bâtiment au complet. Le scénario matériaux (Sc3) permet de diminuer de près de moitié (de 26 % à 14 %) les émissions de GES du gypse employé dans bâtiment. La laine de roche (18 %) et l'acier (14 %) sont les deux plus grands contributeurs. Les émissions potentielles de GES totales de ce scénario sont inférieures de 59 tonnes par rapport à celles du scénario de référence.

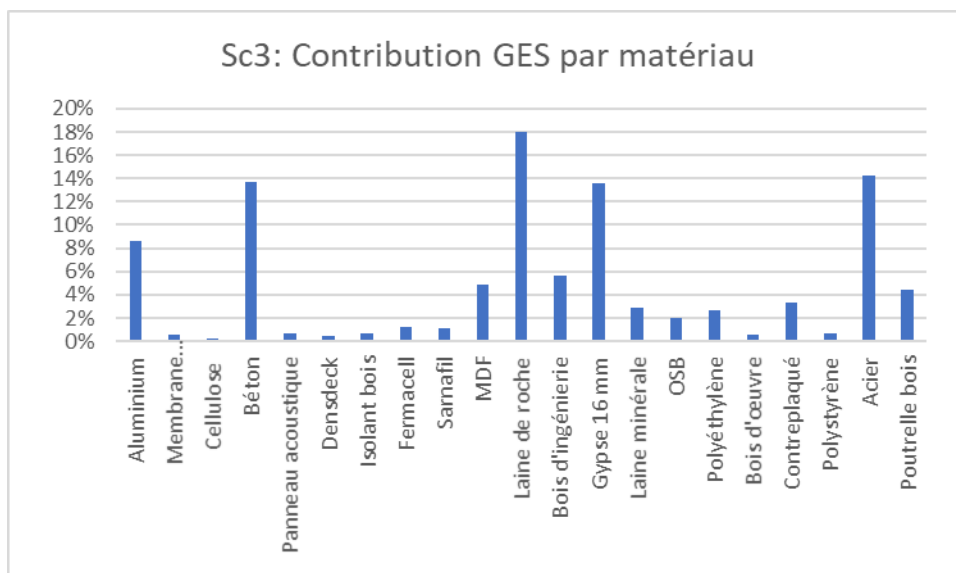


Figure 15. Analyse de contribution de l'étape production du scénario matériaux par matériau

Les émissions de GES de chaque scénario sont résumées au Tableau 19. Les deux dernières colonnes de ce tableau incluent les contributions des écarts d'émissions de GES de chaque matériau à l'écart total avec le scénario de référence.

Tableau 19. Analyse de contribution des matériaux aux émissions de GES des scénarios préfabrication (Sc2) et matériaux (Sc3)

	ScRef60	Sc2 préfab	Sc3 matériaux	Sc2 préfab	Sc3 matériaux
Aluminium	40 752	40 752	40 752	0,0 %	0,0 %
Membrane bitumineuse	8024	8024	2515	0,0 %	11,3 %
Cellulose	1195	1195	1195	0,0 %	0,0 %
Béton	64 702	64 702	64 702	0,0 %	0,0 %
Panneau acoustique	24 687	24 687	3331	0,0 %	43,9 %
DensDeck	0	0	2054	0,0 %	-4,2 %
Isolant bois	0	0	3260	0,0 %	-6,7 %
Fermacell	0	0	5602	0,0 %	-11,5 %
Sarnafil	0	0	5277	0,0 %	-10,8 %
MDF	0	0	22 839	0,0 %	-47,0 %
Laine de roche	89 961	90 762	85 288	59,4 %	9,6 %
Bois d'ingénierie	26 899	26 899	26 899	0,0 %	0,0 %
Gypse 13 mm	39 630	39 630	0	0,0 %	81,5 %
Gypse 16 mm	97 823	97 823	64 244	0,0 %	69,0 %
Laine minérale	13 746	13 746	13 746	0,0 %	0,0 %
OSB	9308	9380	9308	5,4 %	0,0 %
Polyéthylène	12 338	12 338	12 338	0,0 %	0,0 %
Bois d'œuvre	2703	2798	2640	7,0 %	0,1 %
Contreplaqué	15 724	15 979	15 724	19,0 %	0,0 %
Polystyrène	3030	3030	3030	0,0 %	0,0 %
Acier	48 210	48 336	67 424	9,3%	-39,5 %
Poutrelle bois	22 952	22 952	20 880	0,0 %	4,3 %
TOTAL	521 684	523 032	473 047	100,0 %	100,0 %

6.1.2 Analyse d'impacts des scénarios sur 120 ans

6.1.2.1 Analyse comparative des impacts totaux des scénarios

Les impacts potentiels du scénario adaptabilité sont largement plus faibles que les impacts potentiels du scénario de référence pour les cinq catégories d'impacts considérées. Au niveau des émissions de GES, l'indicateur potentiel de réchauffement climatique présente une réduction de presque 50 %. Cela représente, en valeurs absolues, une réduction de 619 tonnes éq. CO₂ par rapport au scénario de référence.

Ce résultat est la conséquence des efforts de conception qui permettent la conversion du bâtiment à l'année 61 du cycle de vie de 120 ans pour une utilisation différente permettant ainsi d'éviter la construction d'un nouveau

bâtiment. Dans la présente analyse, il est important de mettre en évidence que les quantités considérées pour le deuxième bâtiment du scénario de référence sont les mêmes que celles du bâtiment construit initialement. Dans la réalité, le second bâtiment devrait être en mesure de soutenir des charges plus grandes que le premier bâtiment. Par conséquent, les quantités du scénario de référence sont certainement sous-estimées, ce qui viendrait creuser davantage l'écart entre les deux bâtiments.

L'analyse de l'inventaire montre que le scénario adaptabilité consomme légèrement plus de matériaux (3 %) que le scénario de référence. Or, les impacts de cette utilisation accrue de matériaux sont insignifiants lorsqu'on tient compte de la plus grande longévité du bâtiment, faisant en sorte que ce bâtiment durera 120 ans au lieu de 60 ans. Les matériaux qui seraient nécessaire dans l'aménagement des locaux pour en faire des bureaux ou des résidences pour personnes âgées sont en dehors de la portée de l'étude (voir section 5.2.3).

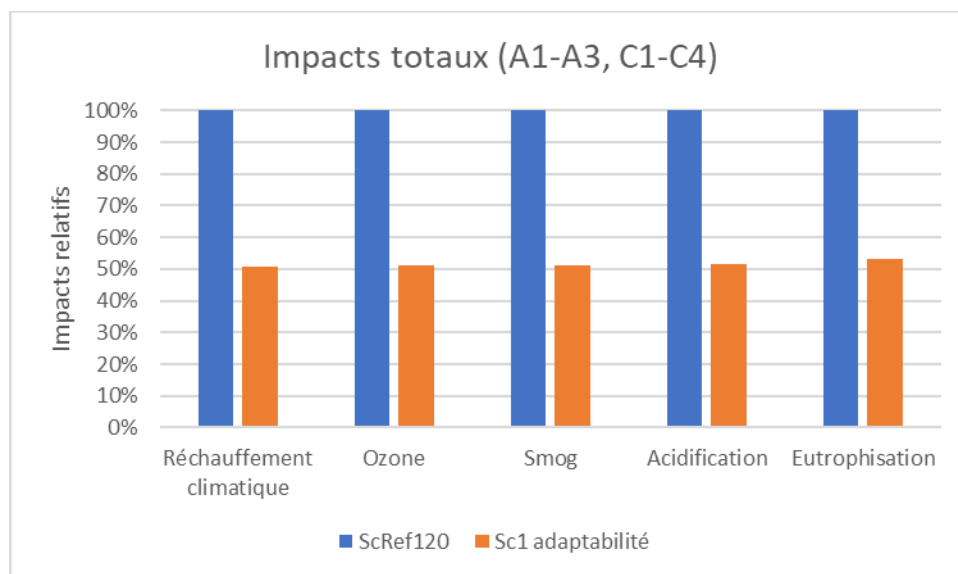


Figure 16. Impacts totaux des scénarios

6.1.2.2 Analyse de contribution des différentes étapes de cycle de vie

La fin de vie des scénarios représente 17 % des émissions potentielles de GES de chaque scénario dans les limites des frontières du système choisies. L'écart entre les modules de fin de vie des scénarios Sc1 et ScRef s'établit à 104 tonnes éq. CO₂. La Figure 17 illustre la répartition des émissions environnementales selon le module production et le module de fin de vie. La contribution du module de fin de vie sur les indicateurs potentiel de création de smog (≈ 44 %) et potentiel d'eutrophisation (≈ 64 %) est plus élevée que pour l'indicateur potentiel de réchauffement climatique.

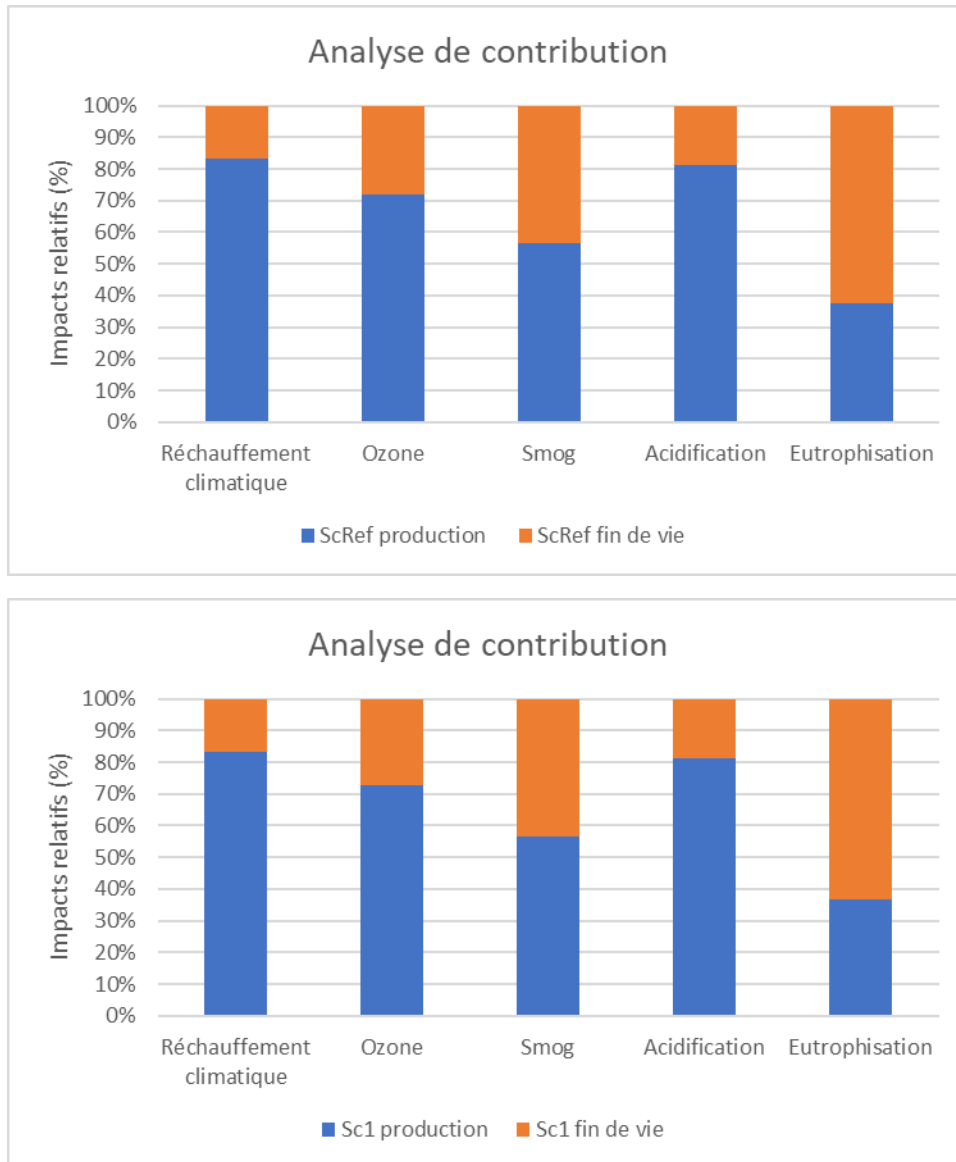


Figure 17. Analyse de contribution aux impacts des étapes du cycle de vie

6.1.2.3 Analyse de contribution des matériaux à l'étape de production (A1-A3)

La contribution des matériaux aux émissions potentielles de GES est identique à celle observée sur 60 ans. Les émissions sont attribuables principalement au gypse (26 %), à la laine de roche (17 %) et au béton (12 %). L'acier et l'aluminium sont respectivement au quatrième et cinquième rang avec 9 % et 8 % des émissions de GES (Figure 18).

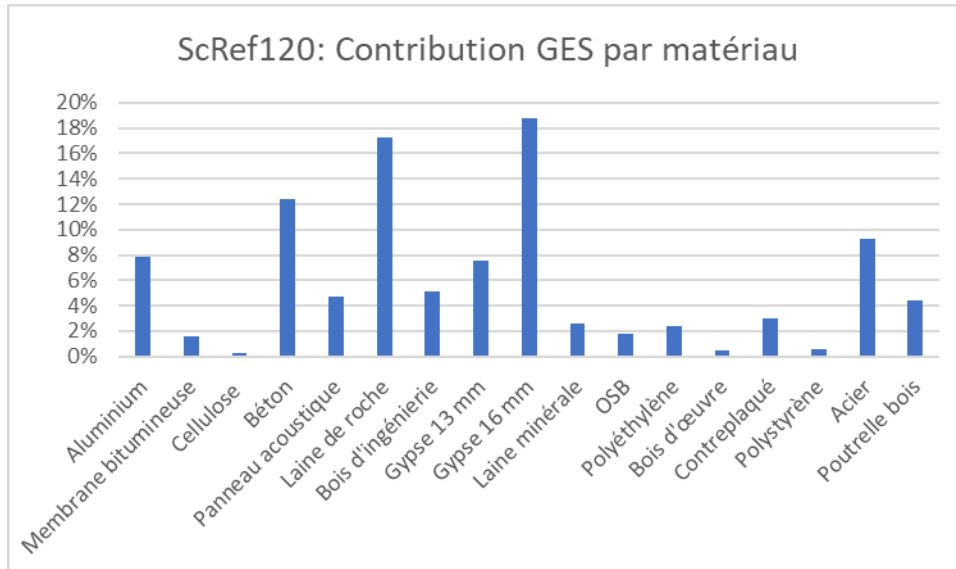


Figure 18. Analyse de contribution de l'étape production du scénario de référence par matériau

La répartition des émissions de GES par matériau demeure, à peu de choses près, inchangée comparativement au scénario de référence. L'écart des émissions de GES entre les deux scénarios s'explique à plus de 50 % par des variations observées au niveau de l'utilisation du gypse (-135 tonnes éq. CO₂), de la laine de roche (-89 tonnes éq. CO₂) et du béton (-74 tonnes éq. CO₂).

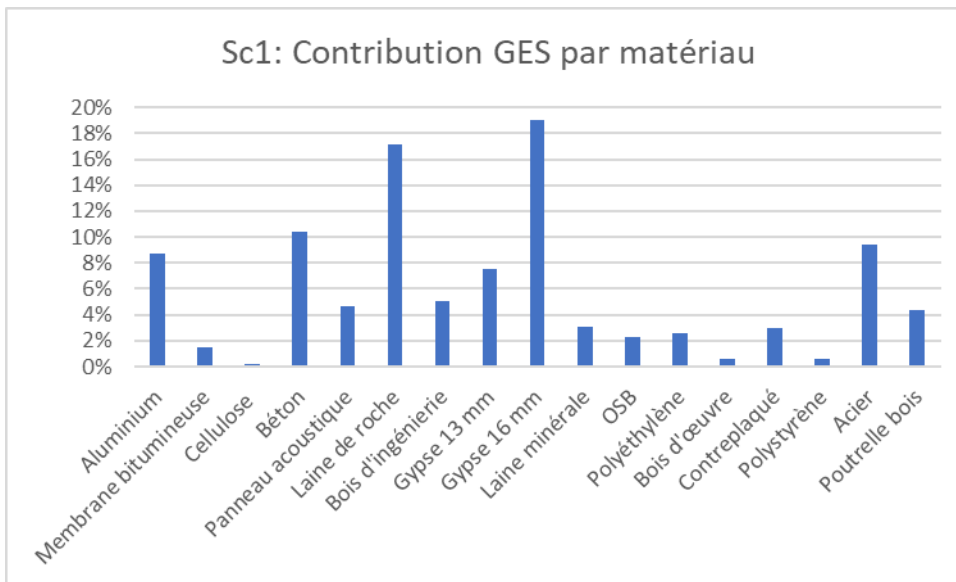


Figure 19. Analyse de contribution de l'étape production du scénario adaptabilité par matériau

Les émissions de GES de chaque scénario sont résumées au Tableau 20Tableau 19. La dernière colonne présente la contribution des écarts d'émissions de GES de chaque matériau par rapport à l'écart total avec le scénario de référence.

Tableau 20. Analyse de contribution des matériaux aux GES du scénario adaptabilité (Sc1)

	ScRef120	Sc1 adaptabilité	Sc1 adaptabilité
Aluminium	81 503	46 067	6,9 %
Membrane bitumineuse	16 049	8032	1,6 %
Cellulose	2389	1078	0,3 %
Béton	129 405	54 997	14,5 %
Panneau acoustique	49 374	24 687	4,8 %
DensDeck	0	0	0,0 %
Isolant bois	0	0	0,0 %
Fermacell	0	0	0,0 %
Sarnafil	0	0	0,0 %
MDF	0	0	0,0 %
Laine de roche	179 922	90 762	17,3 %
Bois d'ingénierie	53 799	26 899	5,2 %
Gypse 13 mm	79 259	39 630	7,7 %
Gypse 16 mm	195 646	100 617	18,5 %
Laine minérale	27 492	16 027	2,2 %
OSB	18 615	11 785	1,3 %
Polyéthylène	24 676	13 805	2,1 %
Bois d'œuvre	5407	3146	0,4 %
Contreplaqué	31 447	15 724	3,1 %
Polystyrène	6060	3030	0,6 %
Acier	96 420	49 919	9,0 %
Poutrelle bois	45 904	22 952	4,5 %
TOTAL	1 043 368	529 156	100,0 %

6.2 Estimation des coûts de construction

L'estimation des coûts de chaque scénario a été faite sur la base des quantités de matériaux estimées pour l'inventaire du cycle de vie environnementale. À chaque quantité, on a associé un coût de matériel, de main-d'œuvre pour l'installation, d'équipements ainsi qu'une marge de profit pour l'entrepreneur général. Ces coûts ont été tirés d'une base de données établie dans l'industrie de la construction soit RSMMeans (Gordian, 2019). Les données économiques sont pour l'année 2019 et ont été adaptées pour la ville de Montréal en appliquant un facteur géographique estimé par le fournisseur.⁴ Dans le cas des matériaux innovants ou pour lesquels aucune

⁴ Le fournisseur ne publie pas de facteur pour la ville de Québec.

donnée n'était disponible, des contacts auprès de fabricants ou représentants commerciaux ont été effectués et les coûts d'installation ont été assignés sur la base de matériaux comparables.

Les coûts du scénario de référence sont estimés à 4 451 000 \$. Une forte proportion de ces coûts est attribuable à la construction des murs intérieurs simples (cloisons) et aux planchers qui représentent respectivement 37 % et 33 % des coûts totaux du scénario de référence. Un 16 % des coûts totaux provient de la construction des murs extérieurs qui ne sont pas des murs de refend (708 000 \$). Les différences avec les scénarios CpD/A oscillent entre - 10 % pour le scénario matériaux à + 1 % pour le scénario adaptabilité.

Le scénario adaptabilité (Sc1) est le scénario qui coûte le plus cher, soit 52 000 \$ de plus que le scénario de référence (Tableau 21) dont le coût est de 4 450 000 \$. La différence réside dans le remplacement des colonnes et poutres par des jambages qui remplissent la même fonction (Figure 20). Le transfert des charges latérales et autres qui se fait par ces colonnes et poutres est en partie repris par des refends qui ont été déplacés dans les murs extérieurs. Ceci permet de dégager de plus grandes portées en cas d'adaptation du bâtiment. Une partie des refends doit être placée dans les murs intérieurs de part et d'autre du corridor central de chaque étage. Ce changement fait augmenter le coût des murs intérieurs (refends ou non) de 5 % soit 87 000 \$. Du même coup, il est possible de retirer quelques murs intérieurs, ce qui réduit le coût de ces éléments de 128 000 \$.

Le coût du scénario préfabrication (Sc2) a été estimé à l'aide de deux méthodes (M1 et M2). La méthode M1 se base sur les coûts estimés par le fabricant de murs pour les murs par section en multiples de quatre pieds linéaires, soit 323 \$/4 pieds. Les coûts de transport et d'installation des panneaux sont estimés à 4,32 \$/pied linéaire. La méthode M2 est fondée sur les coûts des matériaux RSMMeans ajustés pour refléter le salaire horaire des ouvriers en usine (28 \$/heure). Il est à noter que les différences observées dans les murs extérieurs de refend du scénario préfabrication pour les deux méthodes s'expliquent principalement par le fait que l'ossature du bâtiment est comptabilisée dans les murs extérieurs préfabriqués. Une partie la finition est effectuée après que les murs préfabriqués aient été livrés et installés au chantier.

L'écart de coûts le plus significatif se manifeste dans le scénario matériaux (Sc3). Ce dernier est évalué à 459 000 \$. Plus de 80 % de cette différence s'explique par les changements effectués dans les compositions des planchers, et 20 % est attribuable au changement de membrane de toiture. Le remplacement des panneaux acoustiques par des panneaux Fermacell permet de réduire l'utilisation du gypse dans les plafonds de manière importante. Les plafonds du scénario de référence employaient deux panneaux de gypse de 16 mm et un panneau de 13 mm installés sur des fourrures avec des membranes acoustiques en polyéthylène. Les professionnels ayant constaté cette composition ont signalé que cette dernière était inhabituelle et probablement attribuable au cahier des charges. La nouvelle composition élimine le panneau acoustique ainsi qu'un panneau de gypse 16 mm, le panneau de gypse de 13 mm et la membrane acoustique, ce qui donne des économies importantes. L'utilisation de la membrane de toiture fixée mécaniquement permet d'épargner 54 000 \$.

Tableau 21 Coûts de construction des scénarios étudiés (\$2019)

	Scénario de référence	Scénario adaptabilité	Scénario préfabrication (M1)	Scénario préfabrication (M2)	Scénario matériaux
Solives	71 357	69 711	71 357	71 357	71 357
Colonnes	38 674	0	38 674	38 674	38 674
Poutres	35 797	0	35 797	35 797	35 797
Étriers	6981	0	8346	8346	6981
Jambages	0	80 750	3920	3920	0
Planchers	1 453 903	1 453 903	1 453 903	1 453 903	1 064 815
Balcons	74 240	74 240	74 240	74 240	74 240
Murs extérieurs simples	708 263	580 014	414 942	414 942	708 263
Murs ext. préfabriqués	0	0	214 394	276 389	0
Murs extérieurs de refend	89 515	184 954	50 401	50 401	89 515
Murs intérieurs simples	1 649 987	1 330 772	1 649 987	1 649 987	1 634 609
Murs intérieurs de refend	0	406 651	0	0	0
Toit	286 944	286 944	286 944	286 944	232 341
Parapets	35 286	35 286	35 286	35 286	35 286
TOTAL (\$)	4 450 946	4 503 225	4 338 189	4 400 184	3 991 876

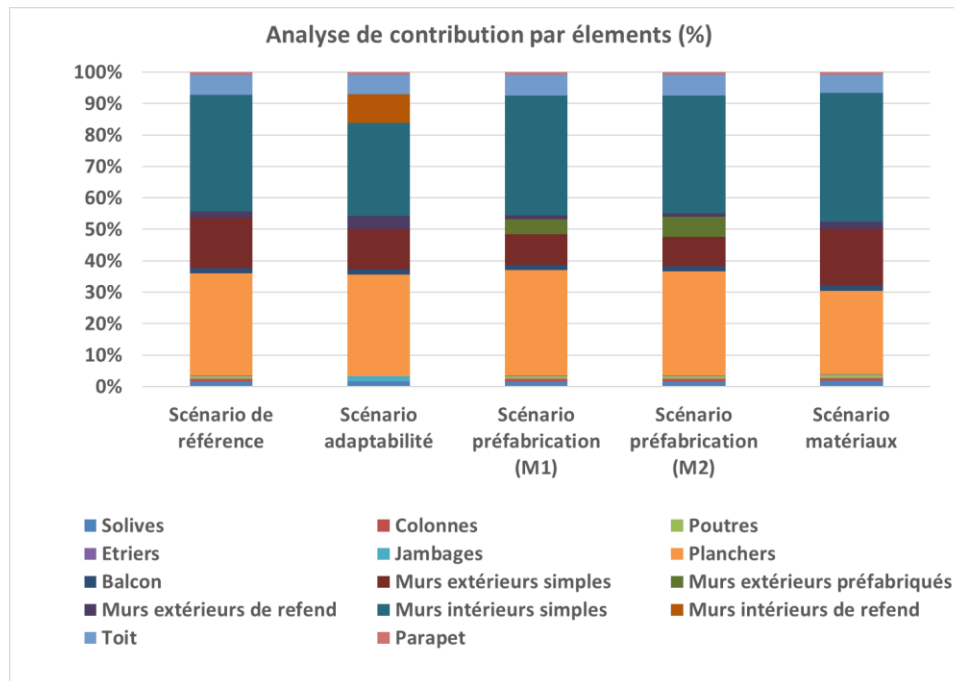


Figure 20 Analyse de contribution des coûts par élément

Les coûts de construction au pied carré sont présentés à la Figure 21. Les coûts sont de 63,52 \$/pi² pour le scénario de référence alors qu'ils se situent entre 62 \$/pi² et 64 \$/pi² pour le scénario préfabrication et le scénario adaptabilité respectivement. Seuls les coûts du scénario matériaux sont inférieurs aux coûts du scénario de référence. Ceux-ci sont de 57 \$/pi². Il importe de souligner que les coûts des finitions, des fondations et d'autres éléments du bâtiment ne sont pas comptabilisés. On estime que ce coût couvre un peu moins de 50 % des coûts de construction complets du bâtiment.

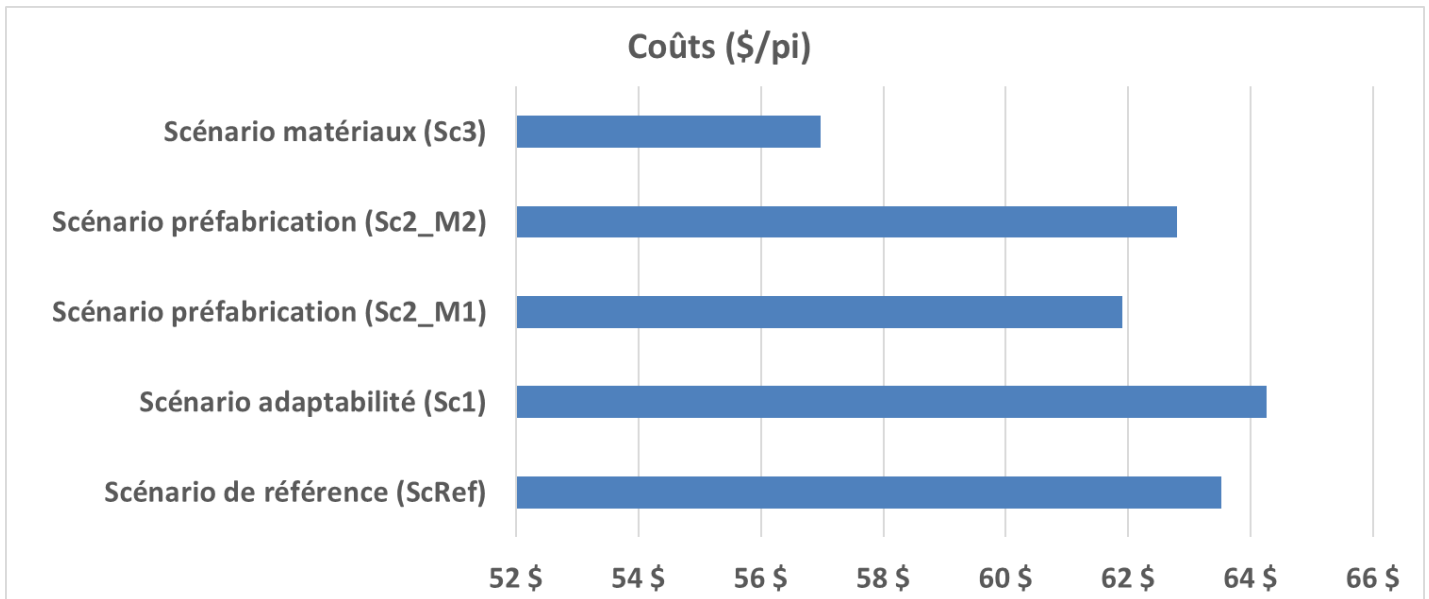


Figure 21 Coûts de construction au pied carré (\$/pi²)

7. ANALYSE DE SENSIBILITÉ

7.1 Prise en compte de la production évitée résultant du réemploi (Module D)

La portée de l'analyse explique les résultats obtenus pour les scénarios préfabrication (Sc2) et matériaux (Sc3). Le module C inclut les activités de démolition, de transport et de traitement des matières résiduelles. En revanche, il n'inclut pas la production évitée des matériaux qui sont récupérés pour être réemployés, recyclés ou valorisés. Les conséquences des choix de conception favorisant la démontabilité appartiennent par conséquent en bonne partie au module D permettant d'allouer les déchets recyclés et revalorisés à des systèmes subséquents sur la base des critères *end-of-waste* (European Commission, 2019).

La production évitée comptabilisée dans le module D est sujette à une certaine incertitude compte tenu qu'elle dépend d'une part des décisions d'acteurs multiples et d'autre part du fait qu'elle surviendra dans 60 ans. C'est une des raisons ayant justifié son exclusion. Une analyse rapide des impacts de cette production évitée est présentée à la Figure 22.

Le scénario préfabrication (Sc2) permet le réemploi des murs extérieurs ayant été conçus de façon modulaire ou standardisée, ce qui permettrait la réutilisation dans un ouvrage subséquent. L'isolation de ces murs pourrait être

bonifiée (p. ex isolant hors cavité) dans le futur alors que les exigences de performance énergétique auront augmenté. La standardisation des dimensions des panneaux peut aussi faciliter l'utilisation. Leur installation de manière à faciliter la démontabilité est aussi aidante en ce sens. Le réemploi des murs permet d'éviter la production de bois d'œuvre (35 000 kg), de contreplaqué et d'OSB (4100 kg), d'isolant en fibre de verre (330 kg) et de type carton fibre (-1 800 kg) ainsi que de polyéthylène (1 kg). Le remplacement des cloisons, qui représentent plus de 80 % des murs du bâtiment, pour des murs préfabriqués, aurait grandement réduit les émissions de GES. La production évitée de polyéthylène explique près de 70 % des émissions évitées dans le module D (trois tonnes éq. CO₂) de ce scénario lorsque seulement les murs extérieurs sont de type préfabriqué.

Le scénario matériaux (Sc3) permet quant à lui de favoriser le réemploi des structures de balcons, des panneaux de MDF remplaçant le gypse ainsi que de la membrane de toiture. Le réemploi de ces éléments permet d'éviter la production de membrane de toiture (- 850 m²), de MDF (- 90 m³) et d'acier (- 30 000 kg).⁵ La production évitée d'acier explique près de 50 % de la réduction potentielle d'émissions de GES totale. La production évitée de MDF représente 40 % des émissions de GES évitées dans le module D de ce scénario. Au total, le module D réduit les émissions potentielles totales de ce scénario de 8 % par rapport au scénario de référence excluant la prise en compte de la production évitée de matériaux (module D). Cette estimation ne tient pas compte de la temporalité des émissions évitées (i.e. aucune actualisation ou normalisation sur la base du forçage radiatif). La réduction des émissions de GES du scénario matériaux (Sc3) atteint 16 % lorsque le module D est pris en compte.

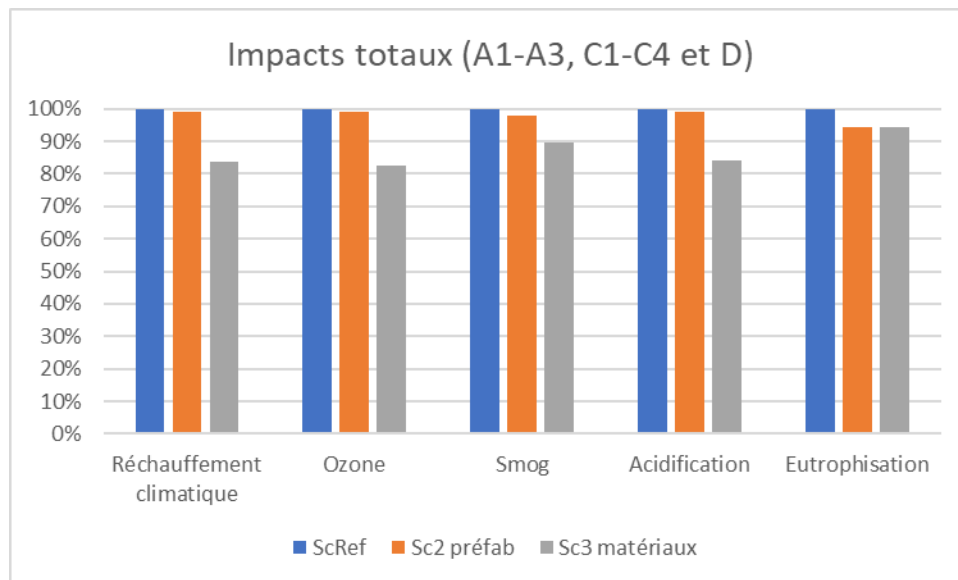


Figure 22. Empreinte carbone du scénario préfabrication incluant la production évitée (module D)

⁵ Hypothèses de taux de récupération allant de 80 % à 90 %.

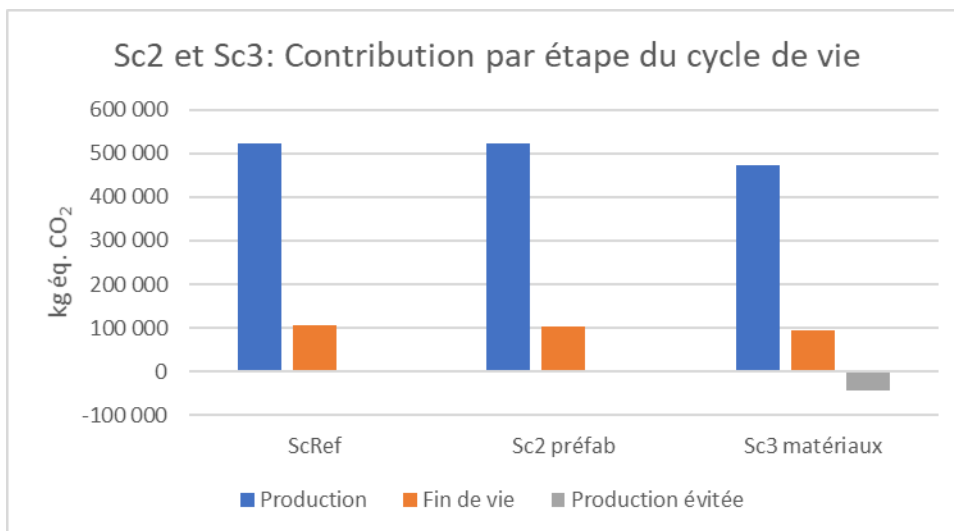


Figure 23. Empreinte carbone du scénario matériaux incluant la production évitée (module D)

7.2 Méthode d'analyse d'impacts environnementaux alternative

L'utilisation de la méthode d'analyse d'impacts IMPACT 2002+ v2.15 donne des résultats comparables à ceux obtenus avec TRACI (Figure 24 et Figure 25).

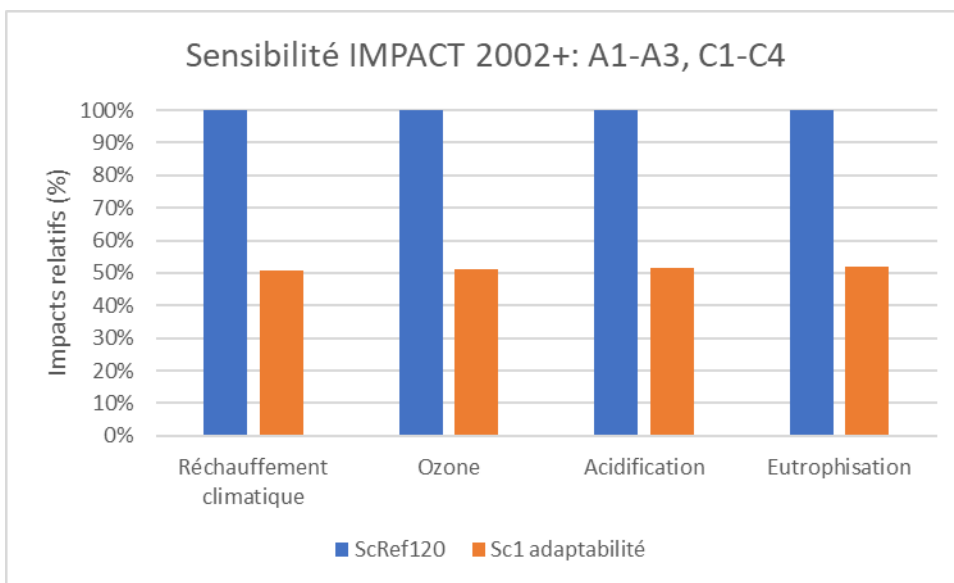


Figure 24. Analyse de sensibilité : Impacts totaux du scénario adaptabilité selon IMPACT 2002+

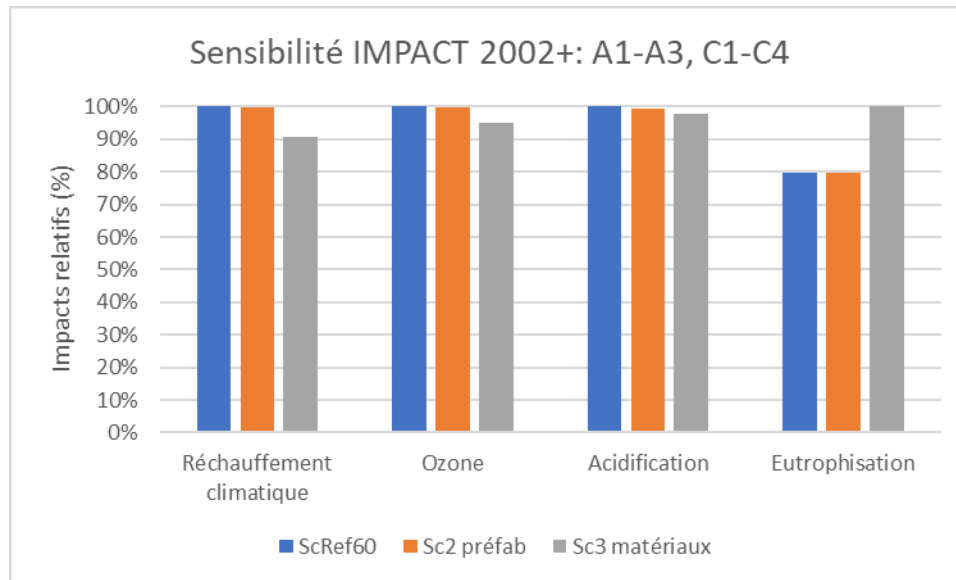


Figure 25. Analyse de sensibilité : Impacts totaux des scénarios préfabrication et matériaux selon IMPACT 2002+

8. DISCUSSION

Les analyses réalisées montrent que la conception pour l'adaptabilité est atteignable pour des bâtiments de moyenne hauteur en ossature légère. Ceci est une conclusion importante de l'étude puisqu'elle va à l'encontre de l'idée préconçue selon laquelle la construction à ossature légère s'applique principalement à la construction résidentielle. Le fait d'utiliser ce système dans un contexte commercial ou multi-résidentiel est une réalisation importante (Gagnon, 2016). L'intégration des principes d'adaptabilité démontre que les limites du système ossature légère ne sont pas encore atteintes et qu'il est possible de poursuivre le développement de cette technologie dans des applications non traditionnelles. Incidemment, l'application des principes CpD/A en construction à ossature légère peut coïncider avec des réductions des coûts de construction. Il s'agit là d'un résultat inattendu qui mériterait d'être validé dans des études ultérieures.

Les impacts environnementaux de choix de conception visant à allonger la durée de vie des bâtiments (Sc1 adaptabilité) et/ou à réduire l'enfouissement au profit du réemploi et du recyclage (Sc2 et Sc3) montrent que le scénario le plus favorable du point de vue environnemental est celui visant l'adaptabilité. Il permet de réduire les émissions de GES de près de 50 % sur la période d'étude de 120 ans. Cette réduction serait plus élevée si les matériaux requis pour construire un édifice à bureaux avaient été considérés dans le scénario de référence; le bâtiment actuel utiliserait moins de matériaux qu'un édifice à bureaux dont les charges à respecter en vertu du code national du bâtiment (CNB) sont nécessairement plus élevées.

Les scénarios de démontabilité présentent des impacts plus nuancés que le scénario d'adaptabilité. Les réductions potentielles d'émissions de GES des scénarios préfabrication (Sc2) et matériaux (Sc3) sont respectivement de < 1 % et 9 %. Les quantités de matières résiduelles totales générées et enfouies sont moindres pour ces deux scénarios. La génération de matières passe de 1442 tonnes dans le scénario de référence à 1406 tonnes dans le scénario préfabrication et à 1329 tonnes dans le scénario matériaux. Aux tarifs actuels, les réductions de coûts de traitement des matières résiduelles seraient évaluées à près de 3000 \$ dans le scénario de préfabrication (Sc2) à

environ 9000 \$ dans le scénario matériaux. Ces coûts, qui devraient augmenter dans le futur, représentent une faible proportion des coûts totaux de construction. La quantité de matières enfouies post traitement au centre de tri passe de 889 tonnes dans le scénario de référence à 865 tonnes et 766 tonnes dans les scénarios préfabrication (Sc2) et matériaux (Sc3) respectivement.

La réduction des matières résiduelles générées et enfouies est en soi un avantage procuré par l'application des principes de démontabilité CpD/A. En effet, au-delà des réductions des émissions de GES, l'application des principes de CpD/A permet de répondre à un enjeu social important, soit celui de la gestion des déchets et des matières résiduelles. On se rappellera que les impacts de la vie se manifestent davantage sur les indicateurs de potentiel d'eutrophisation et de potentiel de création de smog (Figure 11 et Figure 16). À l'échelle québécoise, les émissions de GES issues du secteur des matières résiduelles représentent moins de 6 % des émissions québécoises totales (MELCC, 2019).

Fait notable, les différences observées au chapitre des matières résiduelles ne se traduisant pas en réduction d'émissions de GES peut s'expliquer par les données secondaires utilisées pour modéliser la fin de vie des matériaux et par le fait que la production évitée (module D) ne fait pas partie de la portée de l'étude.⁶ Les données utilisées proviennent de bases de données internationales qui dans un cas ont été adaptées au Québec. La représentativité de ces données devrait être analysée de plus près afin de s'assurer qu'elles reflètent la réalité du Québec.

9. GRILLE D'ÉVALUATION CPD/A

À la lumière des résultats de la présente étude, il est possible d'esquisser l'anatomie de ce que pourrait être une grille d'évaluation CpD/A. La grille proposée s'inspire fortement de l'exemple présenté à l'annexe A informative de la norme ISO 20887 (ISO, 2020). L'objectif de la grille est de faciliter la priorisation des principes CpD/A ayant le plus de bénéfices du point de vue des émissions de GES et en ce qui a trait à la réduction des matières résiduelles. Le niveau de priorité des enjeux soulevés, leur pondération et les échelles et unités applicables devraient être assujetties à une consultation plus formelle impliquant une diversité de parties prenantes. Une telle démarche permettrait de prendre en compte les connaissances et priorités de ces dernières et contribuerait à véhiculer les concepts et principes de la CpD/A. La proposition ci-bas a pour objectif de stimuler la discussion et constitue une première étape dans une démarche plus large à venir.

La grille proposée porte principalement sur les aspects couverts dans ce rapport. Dans la pratique, les aspects relatifs à la mécanique du bâtiment, par exemple, devraient aussi en faire partie.

⁶ Pour l'analyse de sensibilité qui tient compte de ce module d'information, voir section 7.

Tableau 22. Grille d'évaluation CpD/A

Principes	Description			Pointage					Score
	Professionnel concerné	Définition	Base d'estimation	1 pt	2 pts	3 pts	4 pts	5 pts	
1. Principes d'adaptabilité									Nombre de pts obtenus
Polyvalence	Structure	Capacité de la structure à supporter des charges additionnelles en raison d'un changement d'utilisation	Charge additionnelle acceptable	+ 5 %		+ 10 %		+ 20 %	
Convertibilité	Architecture	Finitions minimales permettant l'utilisation des espaces pour différentes fonctions	Pourcentage des espaces polyvalents	5 %		20 %		≥ 30 %	
Capacité d'agrandissement	Structure / architecture	Capacité à ajouter des superficies de plancher additionnelles	Finitions et connexions permettant un/des types d'expansion		Expansion horizontale OU horizontale prévue		Expansion horizontale ET horizontale prévue		
2. Principes de démontabilité	Professionnel concerné	Définition	Base d'estimation	1 pt	2 pts	3 pts	4 pts	5 pts	
Standardisation / modularité	Structure	Répétitivité des éléments structuraux Horizontal: Poutres et poutrelles	Nombre de dimensions de poutres (hauteur x largeur) représentant 60 % des éléments structuraux horizontaux totaux. *Ne pas tenir compte de la longueur.	≥ 7 dimensions		4 à 6 dimensions		≤ 3 dimensions	
Standardisation / modularité	Structure	Répétitivité des éléments structuraux Vertical: Colonnes et murs porteurs	Nombre de dimensions de colonnes (largeur x épaisseur) représentant 60 % des éléments structuraux verticaux totaux. *Ne pas tenir compte de la hauteur.	≥ 10 dimensions	8-9 dimensions	6-7 dimensions	4-5 dimensions	≤ 3 dimensions	
Standardisation / modularité	Architecture	Répétitivité des finitions intérieures	Nombre de finitions différentes	4-6 finitions		≤ 3 finitions			
Standardisation / modularité	Architecture	Répétitivité des finitions extérieures	Nombre de finitions différentes	4-6 finitions		≤ 3 finitions			

Simplicité	Architecture / structure	Qualité d'un assemblage ou d'un système conçu simplement, facile à comprendre et ayant un faible niveau de personnalisation.	Nombre de composantes des systèmes par rapport à des systèmes comparables et niveau de standardisation / modularité		Nombre moyen de composantes des systèmes et niveau moyen de modularité		Faible nombre de composantes des systèmes et haut niveau de modularité	
Facilité d'accès aux composants / services	Structure / architecture	Capacité d'accès aux différents éléments et systèmes	Type d'accès et dommage causé aux éléments avoisinants	Accès limité avec dommage important > 50 % des éléments avoisinants	Accès limité avec dommage mineur à < 50 % des éléments avoisinants	Accès adéquat, dommage mineur à < 50 % des éléments avoisinants	Accès adéquat, dommage mineur à < 25 % des éléments avoisinants	Plein accès, dommage limité aux éléments avoisinants
Sécurité dans la démontabilité	Structure	Démontabilité sécuritaire possible	Niveau de risque pour les travailleurs et importance des mesures de sécurité à mettre en œuvre dans la démontabilité/démontage	Risque moyen et mesures plus importantes que la normale		Risque faible et mesures normales		Risque très faible et mesures normales
Indépendance	Architecture	Capacité de réparer et retirer des éléments sans nuire à la performance des éléments avoisinants	Nombre de systèmes ou éléments ayant été conçus pour être retirés facilement en fonction de leur durée de vie	2-5 éléments installés en tenant compte de la hiérarchie des durées de vie		6-9 installés en tenant compte de la hiérarchie des durées de vie		≥10 éléments installés en tenant compte de la hiérarchie des durées de vie
Durabilité	Architecture	Longue durée de vie des éléments sans nuire aux performances ou la vie utile du bâtiment.	Nombre de matériaux dépassant la durée de vie attendue selon CSA S478 et/ou ISO 15686-8	2-5 éléments		6-9 éléments		≥10 éléments
Conception soutenant des modèles économiques d'économie circulaire	Structure / architecture	Choix de matériaux et de compositions de systèmes permettant de récupérer des matériaux en cours de cycle de vie ou en fin de vie dans un état acceptable pour le réemploi et le recyclage.	Pourcentage des matériaux réutilisables et recyclables sur une base massique *Les matériaux réutilisables tel quels ou après une restauration mineure ont 2 fois plus de valeur. Les matériaux recyclables sont calculés sur une base 1:1.	< 40 %		40-60 %		> 60 %

Connexions réversibles	Structure	Connexions faciles à défaire et qui permettent des modifications et des ajouts à la structure existante.	Pourcentage des types de connexions utilisées qui sont réversibles	20-40 % des types de connexions	50-70 % des types de connexions	> 80 % types de connexions		
Finis inhérents	Architecture	Matériaux avec peu ou pas de finition	Pourcentage des matériaux dont la finition n'est pas un obstacle au réemploi ou au recyclage (base massive)	< 20 %	20-39 %	40-59 %	60-79 %	≥ 80 %
Durabilité	Architecture	Capacité d'un ouvrage et ses composantes de remplir leurs fonctions dans le temps sans réparations majeures	Coûts de réparation prévus sur 60 ans (non-actualisés) relativement au coût de construction initial (%)	> 90 coût initial	60-90 % du coût initial	< 60 % coût initial		
Documentation des procédures de démontabilité et répertoire des matériaux	Architecture / structure	Existence d'une documentation présentant les techniques et approches de démontabilité et répertoriant les matériaux présents dans le bâtiment	Existence et support utilisé		Support électronique SANS mise à jour annuelle	Support électronique mis à jour sur une base annuelle		

10. CONCLUSIONS

L'hypothèse sous-jacente à ce projet de recherche est que l'application des principes CpD/A à la construction à ossature légère dans des bâtiments de moyenne hauteur permettrait de réduire l'empreinte carbone du bâtiment. Quatre grands constats se dégagent du travail effectué :

1. Il est possible d'appliquer les principes de CpD/A à la construction à ossature légère en bois dans des bâtiments de moyenne hauteur.
 - L'analyse effectuée montre que l'application de ces principes n'entraînerait pas de hausse des coûts de construction. Dans la pratique, il est possible de croire que les coûts de construction seraient comparables à ceux des exigences prescrites par le guide de conception de bâtiments de 5 à 6 étages à ossature légère en bois (Cecobois, 2016), c'est-à-dire le scénario de référence.
2. La fin de vie des bâtiments étudiés contribue à environ 17 % de l'empreinte carbone sur la portée du cycle de vie pour l'ensemble des bâtiments étudiés. À titre de rappel, la portée de l'étude inclut la production (modules A1-A3) et la fin de vie (modules C1-C4); elle exclut l'opération des bâtiments (modules B).
3. La plus grande réduction potentielle des émissions de GES (- 50 %) est attribuable à l'augmentation de la durée de vie du bâtiment provenant de l'application de principes d'adaptabilité, c'est-à-dire polyvalence, convertibilité et capacité d'agrandissement (voir section 2).
4. L'application des principes de démontabilité entraîne des réductions moindres atteignant un maximum de 9 % (scénario matériaux Sc3). La prise en compte de la production évitée résultant de la réutilisation de certains éléments et matériaux augmente la réduction de sorte qu'elle atteint 16 %.
 - Une analyse plus poussée des processus utilisés dans la modélisation permettrait de raffiner les résultats de cette analyse.

Les résultats obtenus sont pertinents dans la perspective d'un virage vers l'économie circulaire, la réduction des émissions de GES, l'atténuation des changements climatiques et les enjeux de gestion des matières résiduelles. La CpD/A répond à ces enjeux de manière simultanée. L'application des principes CpD/A est une manière de mettre encore davantage en valeur le potentiel environnemental de la construction en bois. Ceci soulève un questionnement par rapport à la mise en œuvre pratique de ces principes. Des incitatifs, politiques, voire des réglementations permettraient d'accélérer la diffusion de ces concepts et leur application dans des projets de construction immobilière.

Actuellement, les incitatifs à la prise en compte du changement possible d'usage, donc motivant l'application des principes d'adaptabilité sont limités. En effet, peu de propriétaires de bâtiments planifient sur cet horizon de temps et conservent la propriété des bâtiments aussi longtemps. Or, il est clair que la capacité de ne construire qu'un seul bâtiment au lieu de deux engendre une réduction potentielle considérable des émissions de GES et des quantités de matières résiduelles générées (Tableau 15). Cette réduction permet d'éviter des coûts importants pour l'État d'autant plus que le secteur de la récupération est actuellement en crise faute de revenus et de débouchés (Radio-Canada, 2020). Diverses solutions sont considérées incluant la responsabilité élargie des producteurs (REP), le bannissement de l'enfouissement de certaines catégories de matières, les écofraîs, les écotaxes, etc. Ces mesures sont toutes dispendieuses à mettre en œuvre et ne tirent pas profit de la capacité d'innovation et de la créativité des professionnels de l'industrie de la construction ainsi que de celle des

manufacturiers. La conception pour l'adaptabilité pourrait amener une piste de solution aux problèmes découlant des pratiques de conception et à la mise en marché de produits et systèmes difficiles à désinstaller, recycler, etc. Ceci est d'autant plus vrai que la conception pour l'adaptabilité s'inscrit dans la visée de la hiérarchie 3RV-E en misant d'abord sur la réduction à la source. Il s'agit d'une mesure qui porterait ses fruits à long terme et qui pourrait faciliter l'entretien et la rénovation en cours de vie utile.

Le coût d'application des principes d'adaptabilité est faible, s'établissant à moins d'un dollar par pied carré de plancher. Le principal frein à l'application de ces principes n'est donc pas financier. Les obstacles à l'application des principes CpD/A pourraient être en lien avec l'aversion au risque, les questions de responsabilité professionnelle et la nature des activités axée sur les projets de l'industrie de la construction qui sont relevées dans la littérature (World Economic Forum, 2016) (Sumanarathna, Rowlinson, Abankwa, & A., 2019).

Un rapport récent (CCME, 2019) identifie six grandes stratégies ayant une incidence sur le traitement des matières résiduelles soit l'assignation de la responsabilité pour la diversion des matières résiduelles ailleurs qu'à l'enfouissement, limiter les options de disposition en fin de vie, l'alignement des incitatifs financiers, améliorer les processus de gestion des CRD, renforcer les marchés et les infrastructures et le développement des connaissances et de l'imputabilité. La conception pour l'adaptabilité représente une avenue intéressante d'atteindre ces objectifs en considérant ces options en amont du cycle de vie du bâtiment, c'est-à-dire au moment où le bâtiment est conçu. Certes, des mesures peuvent être prises en fin de vie, mais leur efficacité serait probablement bonifiée par une conception intelligente en premier lieu.

Les recommandations avancées sont :

- Évaluer la mise en place d'incitatifs réglementaires, financiers ou autres permettant de réduire les émissions de GES et matières résiduelles générées en fin de vie des bâtiments.
- Éduquer les professionnels et les manufacturiers sur l'importance d'intégrer les considérations de fin de vie au début du processus de conception de produits et bâtiments et, de ce fait, participer au développement d'une économie circulaire.
- Poursuivre le développement de la grille d'évaluation CpD/A notamment en consultant les professionnels de l'industrie et les autres parties prenantes incluant les occupants des bâtiments et la société civile.
- Développer des inventaires de gestion des matières résiduelles et de produits de construction innovants spécifiques au Québec afin de préciser les résultats obtenus.

11. RÉFÉRENCES

- Arrigoni, A., Zucchinelli, M., Collatina, D., & Dotelli, G. (2018, June 20). Life cycle environmental benefits of a forward-thinking design phase for buildings: the case study of a temporary pavilion built for an international exhibition. *Journal of Cleaner Production*, vol. 187, pp. 974-983.
- Athena Sustainable Materials Institute. (2008). *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board*, in *Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment*. Ottawa.
- Athena Sustainable Materials Institute. (2013). *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Medium Density Fiberboard (MDF); 2013 Update*. . Ottawa.
- Bare, J. (2011). TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other Environmental impacts 2.0. . *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5), pp. 687–696.
- Blengini, G. A., & Di Carlo, T. (2010). The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in theLCA of low energy buildings. *Energy and buildings*, vol 42, pp. 869-880.
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, vol 26, pp. 379-388.
- CCME. (2019). *Guide for identifying, evaluating and selecting policies for influencing construction, renovation and demolition waste management*.
- Cecobois. (2016). *Guide technique sur la conception de bâtiments de 5 ou 6 étages à ossature légère en bois. Volume 1: Renseignements généraux*.
- CEN. (2011). *EN 15978:2011. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*.
- Conseil National de Recherche du Canada . (2010). Code de construction du Québec, Chapitre I Bâtiment, et Code national du bâtiment Canada 2010 (modifié). <https://nrc.canada.ca/fr/certifications-evaluations-normes/codes-canada/publications-codes-canada/code-construction-quebec-chapitre-i-batiment-code-national-batiment-canada-2010-modifie>.
- CSA. (2006). *CSA Z782-06. Guideline for Design for Disassembly and Adaptability in Buildings*.
- Doka, G. (2003). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services (Ecoinvent). Ecoinvent Database.
- Doka, G. (2003). *Part V: Building material disposal in Waste treatment*. Ecoinvent Database.
- Ecoinvent. (s.d.). *Introduction to ecoinvent Version 3*. Récupéré sur <https://www.ecoinvent.org/database/introduction-to-ecoinvent-3/introduction-to-ecoinvent-version-3.html>
- European Commission. (2018). *European Life Cycle Database (ELCD)*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>.

- European Commission. (2019, 7 août). *Waste Framework Directive; End-of-waste criteria*. Récupéré sur https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/end_of_waste.htm
- Fermacell. (2016). *fermacell Gypsum fiberboard; Environmental Product Declaration as per ISO 14025 and EN 15804*.
- Gagnon, M. (2016, novembre 30). *Les avancées de la construction écoresponsable en bois*. Récupéré sur Voirvert.ca: <http://voirvert.ca/nouvelles/dossiers/les-avancees-la-construction-ecoresponsable-bois>
- Gordian. (2019). RSMMeans online database. *RSMMeans Data Online Complete*. <https://www.rsmeans.com/products/online/complete.aspx>.
- Gordon Engineering. (1997). *Demolition energy analysis of office building structural systems*. Ottawa.
- Guy, B., Ciarimboli, & Nicholas. (s.d.). *DfD: Design for disassembly in the built environment. A guide to closed-loop design and building*.
- Gypsum Association. (2016). *Environmental Product Declaration according to ISO 14025 and ISO 21930 (Glass Mat Gypsum Panels)*.
- ISO. (2016). *14044:2016. Environmental Management - Lifecycle assessment - Requirements and guidelines*.
- ISO. (2017). *ISO 21930: 2017. Sustainability and buildings and civil engineering works - core product rules for environmental product declarations of construction products and services*.
- ISO. (2020). *ISO 20887:2020. Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil — Conception pour la démontabilité et l'adaptabilité — Principes, exigences et recommandations*.
- Jolliett, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., & Crettaz, P. (2015). *Environmental Life Cycle Assessment*. CRC Press.
- Malmqvist, T., Rasmussen, F. N., Moncaster, A., & Birgisdottir, H. (2020). Circularity in the built environment; a call for a paradigm shift. *Handbook of the Circular Economy*. Aalborg Universitet.
- MELCC. (2019). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2017 et leur évolution depuis 1990*.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs. (2012). *Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques*.
- Morgan, C., & Stevenson, F. (2005). *Design for deconstruction; SEDA design guidelines for Scotland: No. 1*.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2012). *US life cycle inventory database (US LCI)*. <https://www.nrel.gov/lci/>.
- Perry, G., & VanderPol, M. (2014). *Characterization & Management of Construction, Renovation & Demolition Waste in Canada*. https://recycle.ab.ca/wp-content/uploads/2014/10/VanderPol_Perry.pdf.
- PRé Consultants. (2016). *SimaPro, the world's leading sustainability software*. . Pays-Bas: PRé Consultants BV.

- Radio-Canada. (2020, Janvier 22). *Quatre centres de tri menacés de fermeture au Québec*. Récupéré sur <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1486552/environnement-recuperation-recyclage-matieres-enfouissement->
- Recyc-Québec. (2013). *Bilan 2010-2011 de la gestion des matières résiduelles au Québec (révisé en mai 2013)*. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2010-2011.pdf>.
- Recyc-Québec. (2018). *Étude sur le gypse résiduel au Québec; analyse de la filière du recyclage*. .
- Recyc-Québec. (2020, Mars 16). *L'élimination*. Récupéré sur <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-section-elimination.pdf>
- Recyc-Québec. (2020, Mars 16). *Les résidus de construction, de rénovation et de démolition*. Récupéré sur <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2018-section-crd.pdf>
- Sika. (2016). *Roofing: Environmental Product Declaration - Cradle-to-Grave Sarnafil S 327*.
- Sumanarathna, N., Rowlinson, S., Abankwa, & A., D. (2019). Innovation in Construction Contractor Organisations: Adopting the Concept of Exploration-Exploitation. *CIB World Building Congress 2019*. Hong Kong.
- UL . (2019). *UL Environment Standard 10010-9: Product Category Rule (PCR) Guidance for Building-Related Products and Services Part B: Structural and Architectural Wood Products EPD Requirements*.
- World Economic Forum. (2016). *Shaping the Future of Construction; A Breakthrough in Mindset and Technology*.

ANNEXE I - PHASES D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

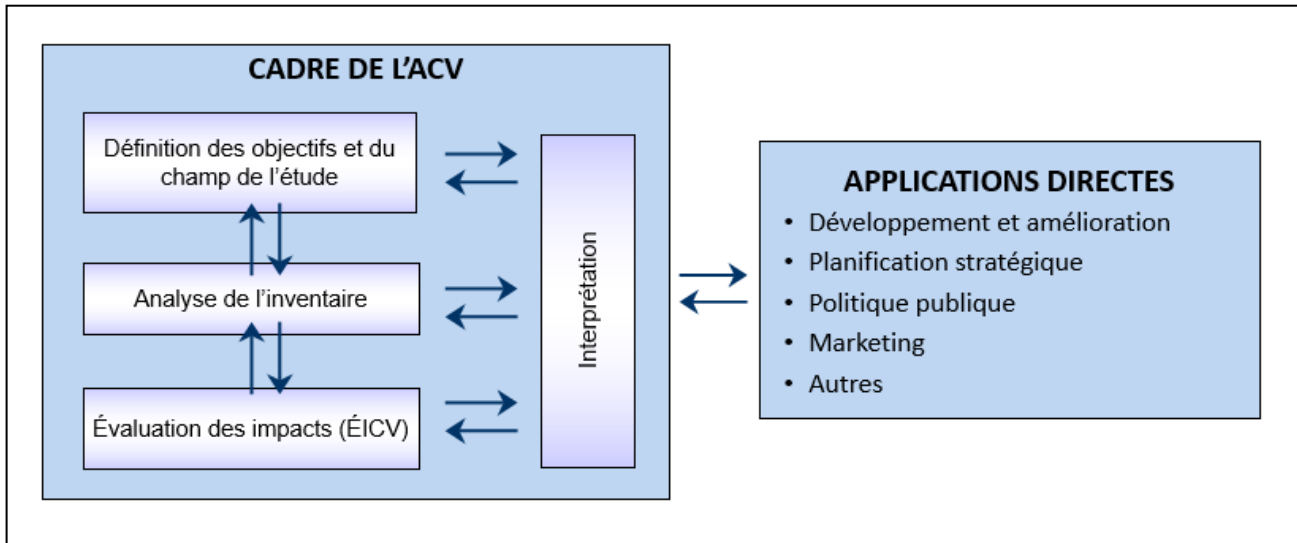


Figure Annexe 1. Les étapes de l'analyse de cycle de vie

Source : (ISO, 2016)

1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

Une ACV commence par un énoncé explicite du but et de la portée de l'étude, de l'unité fonctionnelle, des limites du système, des hypothèses, des limites et des méthodes d'allocation utilisées, ainsi que des catégories d'impact choisies. L'objectif et la portée comprennent une définition du contexte de l'étude qui explique à qui et comment les résultats doivent être communiqués. Le but et la portée d'une ACV sont clairement définis et compatibles avec l'application visée. L'unité fonctionnelle est une unité de référence définie pour la performance quantifiée d'un système de produit auquel tous les flux de l'ACV sont liés. L'allocation est la méthode utilisée pour partitionner la charge environnementale d'un processus lorsque plusieurs produits ou fonctions partagent le même processus (ISO, 2006b).

2. L'inventaire du cycle de vie (ICV)

Dans l'analyse d'inventaire, un modèle de flux du système technique est construit à l'aide de données sur les entrées et les sorties, appelées inventaire du cycle de vie (ICV). Le modèle de flux est souvent illustré par un organigramme qui inclut les activités à évaluer et donne une image claire des limites du système technique. Les données d'entrée et de sortie nécessaires à la construction du modèle sont collectées (telles que les ressources, les besoins énergétiques, les émissions dans l'air et l'eau et la production de déchets pour toutes les activités à l'intérieur des limites du système). Ensuite, les charges environnementales du système sont calculées et liées à l'unité fonctionnelle (UF).

3. Évaluation de l'impact du cycle de vie (ÉICV)

L'analyse de l'inventaire est suivie d'une évaluation de l'impact – où les données de l'inventaire du cycle de vie (ICV) sont caractérisées en termes d'impact environnemental potentiel (p. ex. : acidification, eutrophisation, effets potentiels sur le réchauffement climatique, etc.). Le processus est illustré à la figure ci-haut. La phase d'évaluation de l'impact de l'ACV vise à évaluer l'importance des impacts environnementaux potentiels sur la base des résultats de l'ICV. Au stade de la classification, les paramètres d'inventaire sont triés et affectés à des catégories d'impact spécifiques.

Le calcul des résultats des indicateurs (caractérisation) implique la conversion des résultats de l'ICV en unités communes à l'aide de méthodes d'évaluation de l'impact et de l'agrégation des résultats convertis dans la même catégorie d'impact. Cette conversion utilise des facteurs de caractérisation (CF). Le résultat du calcul est un résultat d'indicateur numérique généralement indiqué sur une base d'équivalence. Dans de nombreuses ACV, la caractérisation conclut l'analyse; c'est également la dernière étape obligatoire selon ISO 14044: 2006. Cependant, certaines études impliquent une étape supplémentaire de normalisation, dans laquelle les résultats des catégories d'impact de l'étude sont comparés à l'impact total dans la région. Lors de la pondération, les différents impacts environnementaux sont pondérés les uns par rapport aux autres pour obtenir un score unique pour l'impact environnemental total.

4. Interprétation

Les résultats de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact sont résumés lors de la phase d'interprétation. Les conclusions et les recommandations sont les résultats de la phase d'interprétation de l'étude. Selon ISO 14040: 2006, l'interprétation devrait inclure :

- l'identification de problèmes importants pour l'impact environnemental;
- l'évaluation de l'étude en tenant compte de la complétude, de la sensibilité et de la cohérence; et
- les conclusions et les recommandations.

La procédure de travail de l'ACV est itérative, comme illustré par les flèches d'avant en arrière de la Figure 4. L'itération signifie que les informations recueillies à un stade ultérieur peuvent affecter une étape antérieure. Lorsque cela se produit, la première étape et les étapes suivantes doivent être retravaillées en tenant compte des nouvelles informations. Par conséquent, il est fréquent qu'un praticien d'ACV travaille à plusieurs étapes en même temps.

ANNEXE II - COMPTES-RENDUS DES ATELIERS

Compte-rendu de l'atelier no. 1 (22 octobre 2019)

Participants et facilitateurs

Liste de participants au premier atelier

Prénom	Nom	Affiliation
Luc	Morneau	Récyc-Québec
Cassandra	Lafond	FPIinnovations
Samuel	Cuerrier Auclair	FPIinnovations
Camille	Laflamme	FPIinnovations
Patrick	Lavoie	FPIinnovations
Vincent	Blanchard	FPIinnovations
Dieudonné	Batsy	FPIinnovations
Stéphan	Langevin	STGM
Simon-Pierre	Fortier	STGM
Jean-Philippe	Carrier	L2C
Marc	Asselin	RBR

Description du projet

La conception pour la démontabilité (CpD/A) ou de l'anglais *Design for Disassembly and Adaptability* (DfD/A) est une démarche en matière de durabilité qui permet de réduire l'empreinte écologique de l'industrie du bâtiment, car elle favorise la diminution des déchets produits, l'augmentation de la durée de vie des bâtiments et la réduction de la consommation d'énergie par le biais de la conception intelligente. À ce sujet, l'Association canadienne des normes (CSA) a produit en 2006 quelques lignes directrices pour mieux orienter et aider les architectes, ingénieurs et toutes les parties prenantes impliquées dans le domaine du bâtiment à faire de la CpD/A. D'ailleurs, ces lignes directrices et principes font actuellement l'objet d'une norme internationale (ISO/DIS 20887) intitulée : *Développement durable dans les bâtiments et ouvrages de génie civil - Conception pour la démontrabilité et l'adaptabilité : Principes, exigences et recommandations*.

Étude de cas

Pour mener à bien l'application des principes de conception, le bâtiment PAL6 (PAL6 est un logement social de six étages) situé à Pointe-aux-Lièvres a été identifié comme bâtiment de référence pour notre étude de cas. Ce bâtiment a déjà fait l'objet d'une étude de cas dans un projet précédent mené par FPIInnovations en collaboration avec STGM.

Objectifs du projet

Le projet consiste à reconcevoir, modifier ou adapter les plans existants du bâtiment en incorporant les principes de CpD/A, dans le but de comparer les scénarios de bâtiments reconçus, modifiés ou adaptés avec le bâtiment de référence (bâtiment tel que construit) via des analyses de cycle de vie environnementale (ACV) et économique (ACVE).

Plus concrètement, le projet vise à évaluer aussi bien la réduction d'émissions de GES, que les coûts et bénéfices résultants de l'application des principes de CpD/A.

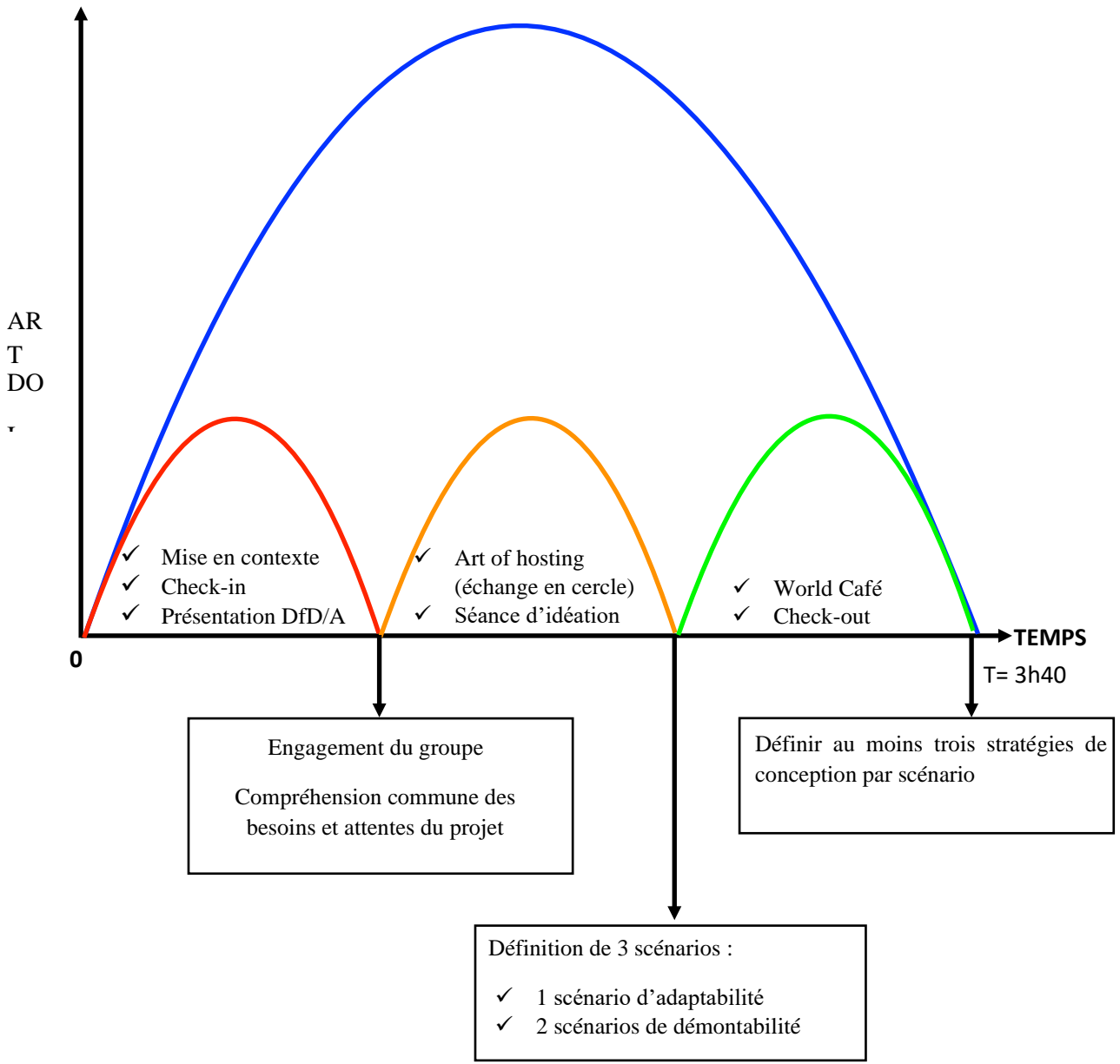
Objectifs de l'atelier

L'objectif principal de l'atelier est de rassembler autour d'une même table les connaissances et expertises cumulées des professionnels et chercheurs dans le domaine de la construction afin de réfléchir ensemble sur les enjeux pour permettre de mieux concevoir les bâtiments aujourd'hui pour mieux les déconstruire demain.

1. Générer quelques scénarios alternatifs possibles en lien avec l'idée de conception pour la démontabilité;
2. Sélectionner au moins trois scénarios alternatifs dont un scénario sur le principe de l'adaptabilité et deux autres scénarios sur le principe de démontabilité;
3. Définir trois stratégies de conception spécifiques applicables à chacun des scénarios alternatifs retenus.

Déroulement de l'atelier selon le format *I DO ART*

- **I** = Intention profonde
 - Promouvoir la lutte contre les changements climatiques à travers l'écoconception CpD/A, qui est une démarche visant à réduire l'empreinte écologique de l'industrie du bâtiment en réduisant les déchets produits en fin de vie.
 - Réfléchir ensemble sur les enjeux pour permettre de mieux concevoir les bâtiments aujourd'hui pour mieux les déconstruire demain.
- **DO** = Objectifs de la demi-journée
 - Identifier au moins trois scénarios alternatifs à étudier dont un scénario sur les principes l'adaptabilité et deux autres scénarios sur les principes de démontabilité;
 - Définir les stratégies de conception spécifiques applicables à chacun des scénarios définis.
- **A** = Agenda
 - mise en contexte
 - check-in
 - présentation sommaire du projet DfD/A (rappel & précision)
 - art of hosting (échanges en cercle)
 - séances d'idéation
 - pause-santé
 - world café
 - check-out
- **R** = Règles (balises) - être à l'écoute
 - participer
 - avoir du plaisir
 - être bienveillant
 - faire confiance
 - être dans le respect
 - être dans le lâcher-prise et le non jugement
 - laisser le libre-arbitre
 - utiliser l'espace (être bien)
- **R** = Temps : 3h40



Déroulement de l'atelier

L'atelier de cocréation s'est bien déroulé selon les activités initialement planifiées. Les trois principales activités (l'échange en cercle, la séance d'idéation et le world café) ont produit les résultats escomptés.

Échange en cercle

L'échange en cercle a suscité une discussion passionnante sur la thématique entre les participants. Celle-ci a permis une génération d'idées plutôt convergentes les unes des autres.

Durant la discussion, les facilitateurs et les participants se sont mis d'accord sur le fait que les principes de CpD/A ne seront pas appliqués sur le bâtiment actuel tel que construit. De fait, pour mieux intégrer les principes, il a été convenu que la conception du bâtiment devrait être repensée en partant de zéro, mais en gardant en tête une contrainte principale, à savoir la nécessité de reconcevoir en ossature légère.

Ensuite le groupe s'est penché sur les contraintes liées à la conception d'un bâtiment fonctionnellement adaptable. À ce sujet, les seules contraintes à la conversion ou transformation sont plutôt les charges de planchers. En effet, les charges de planchers sont plus fortes dans un édifice à bureau que dans un édifice à logement.

La solution proposée est donc de reconcevoir un bâtiment ayant une structure surdimensionnée pouvant servir à n'importe quel type d'usage, et ce, peu importe la fonction du bâtiment (p. ex. : édifice à bureaux, édifice à logements, édifice mixte, etc.).



Résultats

À l'issue de l'échange en cercle, le groupe est parvenu à définir trois scénarios dont un scénario d'adaptabilité et deux scénarios de démontabilité décrit comme suit :

- Un scénario d'adaptabilité caractérisé par un bâtiment à logements ayant une structure surdimensionnée. Étant donné que la fonction de la seconde vie du bâtiment importe peu pour une telle conception, celle-ci sera définie ultérieurement;
- Un scénario de démontabilité caractérisé par une conception mettant l'accent sur l'utilisation des éléments et composants préfabriqués (PREFAB); et
- Un autre scénario de démontabilité caractérisé par une conception mettant l'accent sur certains matériaux afin de réduire le taux de déchets enfouissables de ces matériaux en fin de vie de bâtiments.

Autres points soulevés

Plusieurs idées et propositions techniques ont été émises durant l'échange. Voici les plus importantes :

- Contraintes
 - Espacement 12 po pour bureaux, car les charges de planchers sont plus élevées
 - Espacement 16 po pour logements car les charges de planchers sont plus faibles
- Possibilités
 - Planchers PREFAB
 - ✓ Minimise le surcoût
 - ✓ Montage plus facile
 - ✓ Temps plus rapide
 - ✓ Contreplaqué pour limiter les vibrations
 - ✓ Chape de béton
- Aspect contamination des matériaux
 - Assemblage apparent (standard)
 - Ouverture pensée (fenêtres et portes)
- Aspect structure
 - Limiter le nombre de connexions (plaques et étriers)
 - Ne pas perdre de vue les craintes de résistance aux séismes
 - Optimiser l'axe colonne et poutre
 - Optimiser la portée (colonne vertébrale bien pensée selon le code)
 - Envisager une dalle collaborante
- Point très positif
 - La démontabilité de vieux bâtiments en bois (dans 60 ans) présente un certain avantage, car les planchers sont plus secs (faible humidité d'environ 8 %)



Séance d'idéation

Étant donné que les trois scénarios avaient été identifiés avant la séance d'idéation, le groupe a été invité à inscrire sur des post-it de différentes couleurs en un ou deux mots clés les possibles enjeux ou stratégies spécifiques relatifs à chacun des scénarios. Pour ce faire, trois questions ont été formulées, à savoir :

- Scénario 1 : Quels sont les critères de conception applicables à une structure à ossature légère pour s'assurer d'obtenir une structure standard surdimensionnée et adaptable à tout usage ultérieur?
- Scénario 2 : Comment le PRÉFAB peut aider à la démontabilité?
- Scénario 3 : Comment le choix des matériaux ou systèmes constructifs peuvent contribuer à la démontabilité?

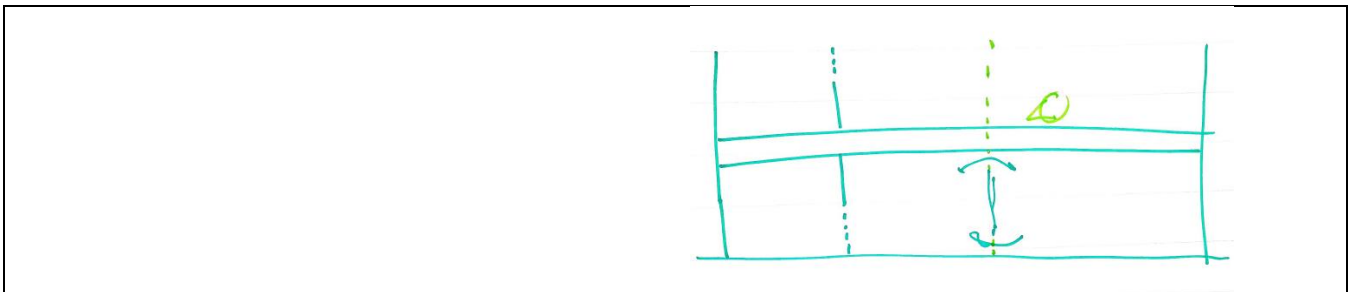
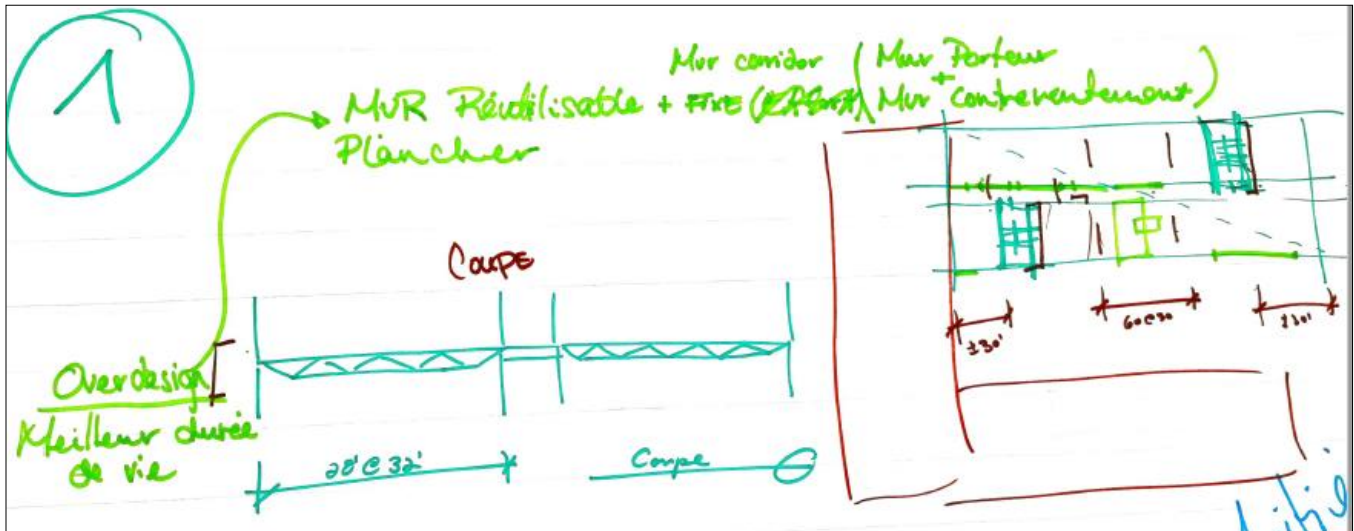
World Café et résultats

Le World Café a permis de scinder le groupe en trois sous-groupes de trois à quatre personnes pour réfléchir au développement des stratégies de conception spécifiques pour concrétiser et adapter les plans de construction associés à chacun des scénarios alternatifs définis.

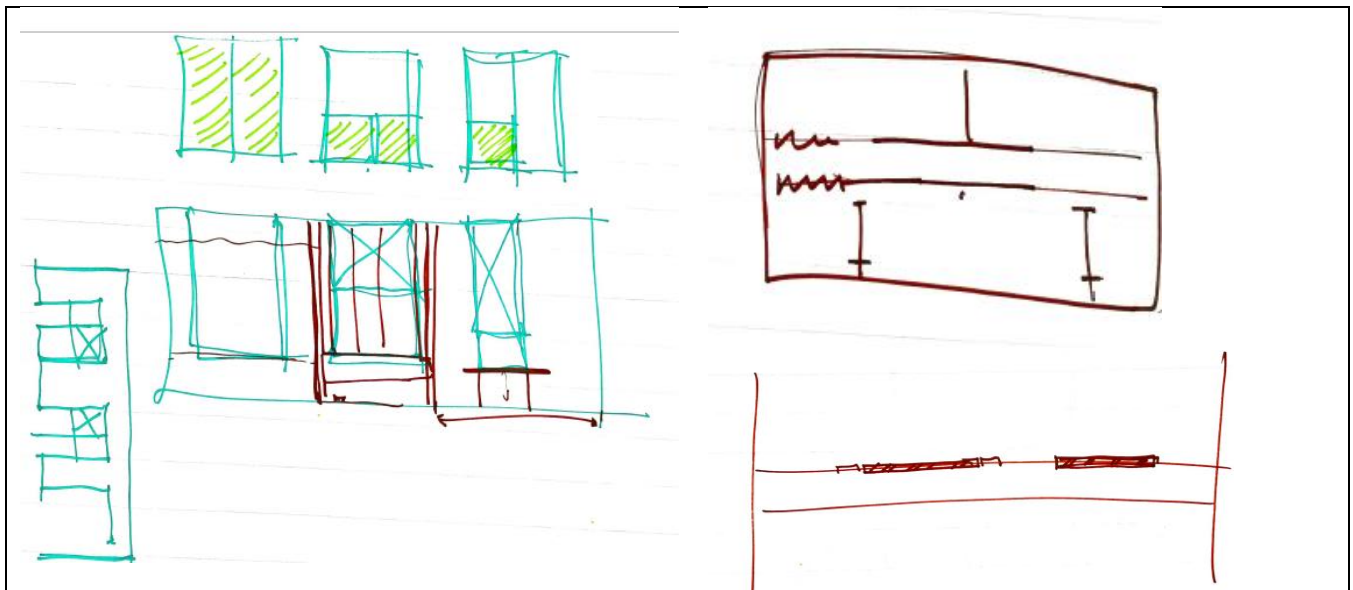
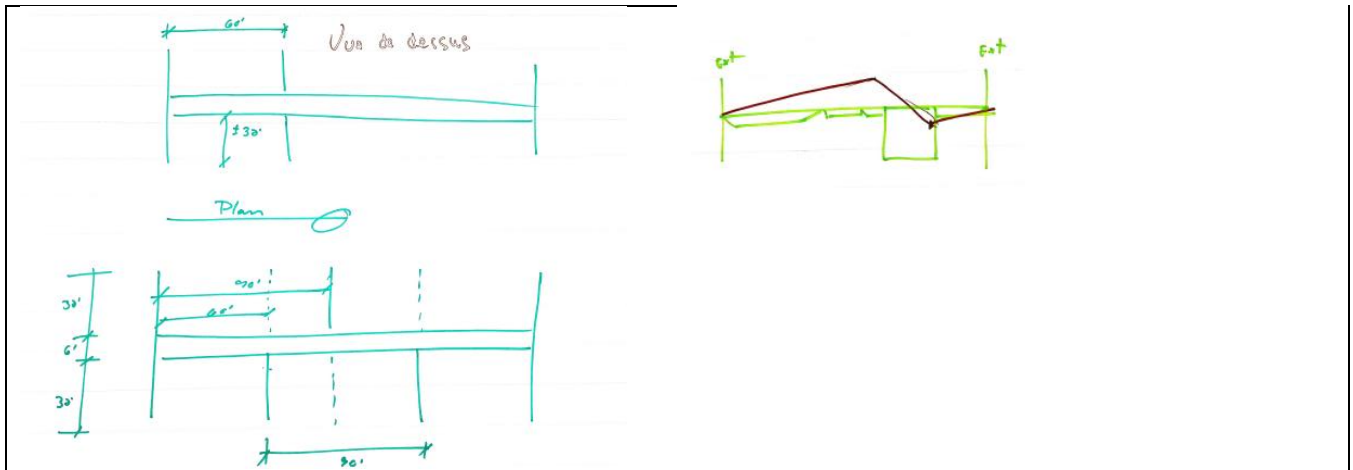
Les trois sous-groupes avaient le mandat d'articuler au mieux les possibles stratégies de conception de chacun des scénarios en ayant toujours en tête les questions présentées durant la séance d'idéation.

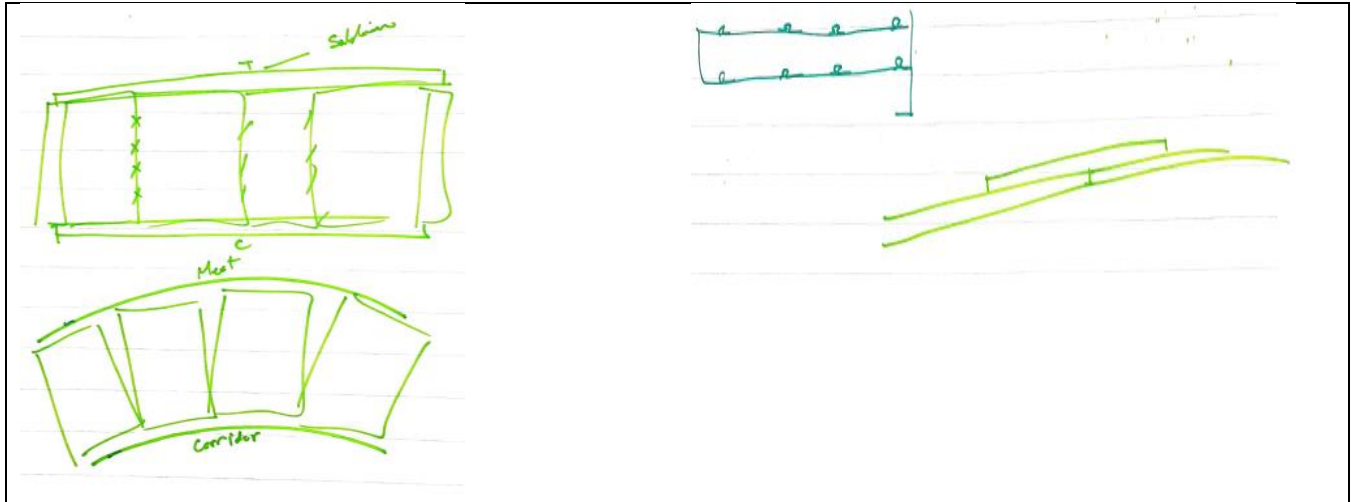
QUESTION 01 : Quels sont les critères de conception applicables pour obtenir une structure standard et adaptable ?

1. Articulation des aspects techniques :
 - Les murs de contreventements doivent être décalés (à l'inverse d'être symétrique ou face à face), et doivent être entrecroisés avec les liens continus (horizontal)
 - Une portion des murs de contreventements doit rester permanents (fenêtres à l'extrémité)
 - Éléments permanents
 - Escaliers d'issues (moitié de la diagonale)
 - Respecter cette distance
 - Systèmes mécaniques centralisés autour d'éléments fixes (comme les escaliers)
 - Réfléchir au positionnement des systèmes mécaniques/PoD⁷
 - Centraliser les systèmes mécaniques dans les PoD pour desservir les aires de services
2. Quelques schémas techniques esquissés pour illustrer la conception de la structure standard et adaptable.



⁷ PoD : Petites unités modulaires





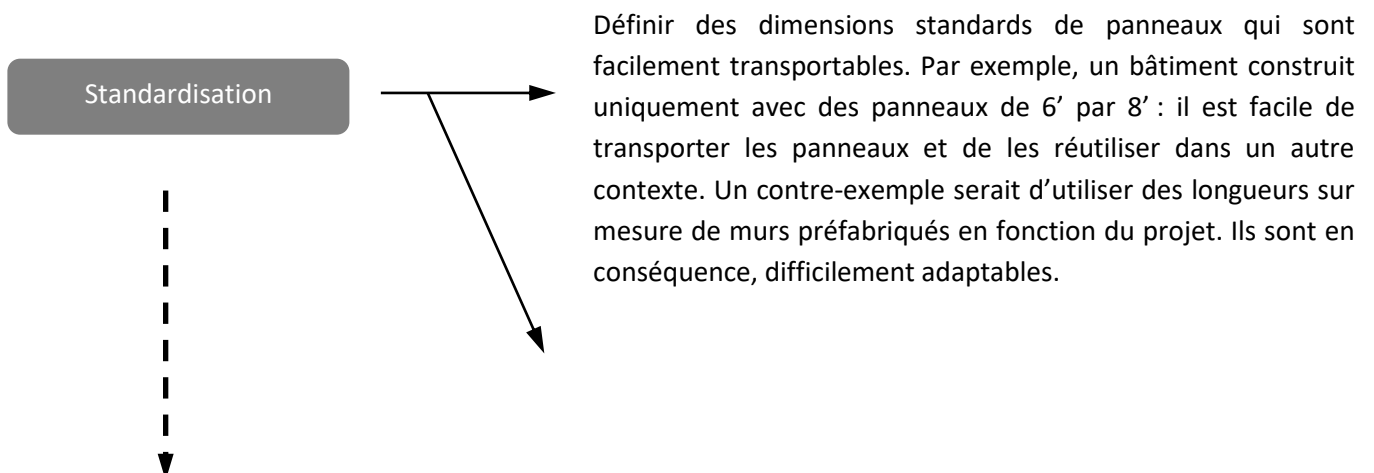
QUESTION 02 : Comment la préfabrication peut faciliter l'adaptabilité et la démontabilité ?

Deux conclusions générales :

1. Exclure l'option de construire des modules préfabriqués. L'adaptabilité du bâtiment devient plus complexe malgré sa facilité de désassemblage.
2. Les panneaux préfabriqués sont mis de l'avant. Cet aspect a été développé afin de montrer comment il peut favoriser la démontabilité.

Aspects techniques discutés par rapport aux panneaux préfabriqués :

- ✓ Standardisation des panneaux
- ✓ Documentation du type de panneau
- ✓ Assemblages réversibles entre les panneaux



Définir des panneaux de hauteur standard et de longueur variable pour les ouvertures. Par exemple, une fenêtre a généralement un linteau à 7' et l'allège à 4' du sol, et ce, peu importe la largeur.

Documentation des types de panneaux

La standardisation des dimensions permettrait aux compagnies de préfabrication de se créer une charte/fiche technique de panneaux avec différentes capacités structurales, mais qui aurait des dimensions constantes. Ainsi, chaque type de panneau aurait une certification de la compagnie décrivant les caractéristiques de l'assemblage. Les panneaux pourraient ensuite être réutilisés de manière appropriée selon leurs propriétés structurales et leurs dimensions.

Type de panneau	Charge maximale	Largeur disponible	Hauteur disponible
A	x kN	4' / 6' / 8'	8' / 9' / 10'
B	y kN	4' / 6' / 8'	8' / 9' / 10'
C	z kN	4' / 6' / 8'	8' / 9' / 10'

Compagnie x
Type A - 6' x 8'

Développer une méthode d'assemblage des panneaux de manière qu'ils puissent être facilement désassemblés. La réversibilité des connexions est primordiale pour le concept de démontabilité.

Assemblage réversible

Pourquoi la standardisation des panneaux préfabriqués favoriserait la démontabilité ?

Prenons exemple d'un bâtiment construit avec un type de panneau mural A – 6'x8'. Un éventuel plan de désassemblage comporterait le tableau de la compagnie x. À ce moment, il serait facile d'identifier que tous les joints entre les panneaux se trouvent aux 6' c/c. La démontabilité ciblée des sections de murs permettrait une excellente organisation dans les travaux de désassemblage. Les fixations réversibles assureraient que les modules de murs ne soient pas abîmés lors des travaux de désassemblage. Finalement, les panneaux pourraient être aisément réutilisés dans différents projets grâce à leurs fiches techniques qui spécifient les propriétés du modèle.

QUESTION 03 : Comment les choix de matériaux ou des systèmes constructifs peut faciliter la démontabilité ?

Aspects techniques discutés par rapport choix de matériaux :

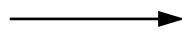
- ✓ Il y a un intérêt d'utiliser des matériaux de plus grande valeur / de meilleure qualité. Ceci favoriserait le réemploi. Un contre-exemple de matériaux serait des fenêtres de PVC, du fibrociment friable et une ébénisterie de faible qualité.
- ✓ Réduire au maximum la quantité de matériaux dans le bâtiment. En poussant ce concept, imaginons une construction 100% composée de bois. Il serait possible de démolir et retransformer la matière pour en faire des panneaux ou produire de la bioénergie. Il n'y aurait pas de démontabilité alors le thème serait plutôt *Design for Recycling and Energy Production*.
- ✓ Travailler avec un connecteur universel (ou standardisé) pouvant servir au transport, levage, assemblage et la démontabilité.
- ✓ Le béton et le gypse sont les deux principaux matériaux problématiques ciblés.

Béton

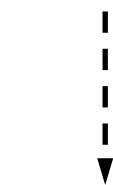


Il y a un risque de contamination du bois. L'utilisation d'une chape sèche (Fermacell) ou d'une chape en béton préfabriqué a été suggérée. Dans le cas des panneaux préfabriqués, l'emplacement des connexions avec le plancher de bois devrait être prévu d'avance. Des fixations physiques (e.g. vis / connecteurs) seraient utilisées, voire même un béton léger facile à casser. Cette proposition rejoint l'idée de dalle collaborante qui assurerait un meilleur tri à la source en fin de

Gypse



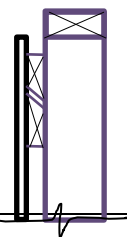
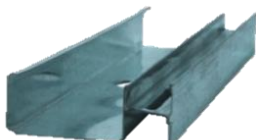
Il s'agit d'une contamination généralisée et le principal matériau enfoui. Il est difficile de remplacer le gypse encore plus dans des constructions à ossature de bois. Est-ce qu'il serait possible de trouver une finition acceptable culturellement parlant et qui répond à un certain degré de résistance au feu? Un OSB pourrait recevoir un placage feuillu qui serait peint intumescent ou recouvert de Shikkui, est-ce que la performance répondrait aux critères du Code et d'esthétique ? À développer.



Fixation du gypse



Étant contraint à l'utilisation du gypse, il serait important de penser à une fixation alternative qui serait réversible. Différents systèmes tels que les colombages pour parois de puits (colombage CH) permettent de venir glisser les panneaux de chaque côté du H. Ce principe pourrait être imité en ossature légère de bois avec un *T-clip* apposés de chaque côté du colombage de bois.



Un autre système simple gravitaire pourrait être utilisé pour déposer les panneaux de gypse sur les colombages.

Autres points abordés :

- ✓ L'idée d'un revêtement facile à désinstaller (rivets) a été discutée. Ce n'est pas nécessairement mieux que les panneaux d'aluminium qui existent actuellement.
- ✓ L'idée de sortir les fenêtres des murs a été discutée. Elle repose sur l'utilisation de murs latéraux ainsi que de murs inférieurs et supérieurs de dimensions standardisées pour presser la fenêtre en place.

Compte-rendu de l'atelier no. 1 (14 novembre 2019)



APPLICATION DES PRINCIPES DE CONCEPTION POUR LA DÉCONSTRUCTION (CO-P-DÉ) ET L'ADAPTABILITÉ AU BÂTIMENT POINTE AUX LIÈVRES (PAL6)

Résumé de l'atelier de cocréation 02

Dieudonné Batsy

Patrick Lavoie

Camille Laflamme



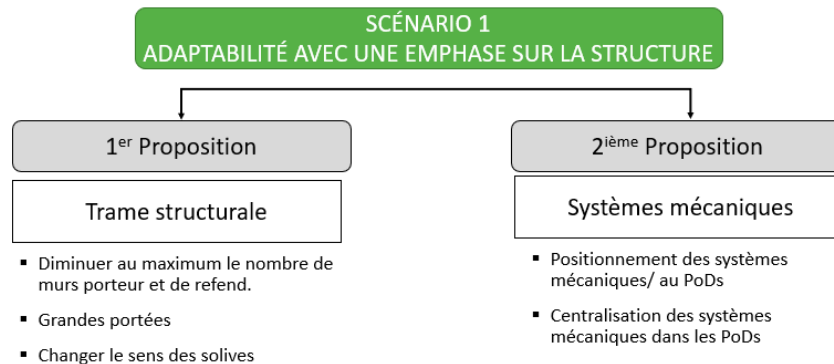
Copye et redistribution interdites. Copying and redistribution prohibited.

COMPTE-RENDU ATELIER 02

- ❑ Scénario 1 , Adaptabilité: Conception & Dimensionnement
 1. Points discutés
 2. Conclusions
 3. Procédure
- ❑ Scénario 2 , déconstruction : préfabrication
 1. Points discutés
 2. Conclusions
 3. Procédure
- ❑ Scénario déconstruction – Matériaux
 1. Conclusions
 2. Procédure



SCÉNARIO 1 , ADAPTABILITÉ: CONCEPTION & DIMENSIONNEMENT



3

SCÉNARIO 1 , ADAPTABILITÉ: CONCEPTION & DIMENSIONNEMENT

POINTS DISCUTÉS

- Classe sismique (Classe C au lieu de la classe E)
- Trame structurale
 - Portée des murs extérieurs
 - Grande portée ()
 - Petite portée ()
- Méthode de calcul (choix ? Code?): Validation avec des experts (Terry Malonne)
 - Méthode de murs perforés
 - Code canadien
- Corridors
 - Doubler les murs de refend

- Planchers (contrainte: 2.4 kPa)
 - Effets tube/effets ductile/diaphragme?
 - Comment concevoir ou régler le problème du diaphragme?
 - Aller au 3 et 4 axes
 - Double contreplaqués (1.7 la résistance latérale)
 - Comment les poutrelles peuvent contribuer au diaphragme ? Ajouter en conclusion
 - Vérifier l'effet de tension
 - valider effet contributif du double contreplaqués

4

SCÉNARIO 1 , ADAPTABILITÉ: CONCEPTION & DIMENSIONNEMENT

CONCLUSIONS

- Changer la classe sismique (C plutôt que E)
 - Refaire les calculs du bâtiment existant en tant que classe C
- Utiliser une charge de plancher de 2,4 kPa
- Doubler le contreplaqué dans les murs de refend pour avoir $\approx 1,7$ fois la résistance
 - Principalement dans le corridor
- Mentionner dans le rapport la différence entre les méthodes de calcul des murs de refend
 - Méthode de contraintes définies/murs perforés (Code américain) = plus de surface de mur extérieur plein, donc moins de murs de refend dans le bâtiment.
 - Méthode des états limites/murs pleins (Code canadien) = moins de surface de mur extérieur plein donc plus de murs de refend dans le bâtiment.
- Mentionner dans le rapport une faiblesse dans les calculs de diaphragmes
 - Les solives ne sont pas considérées dans les calculs du diaphragmes. Il serait intéressant de mener une étude sur son influence.

5

SCÉNARIO 1 , ADAPTABILITÉ: CONCEPTION & DIMENSIONNEMENT

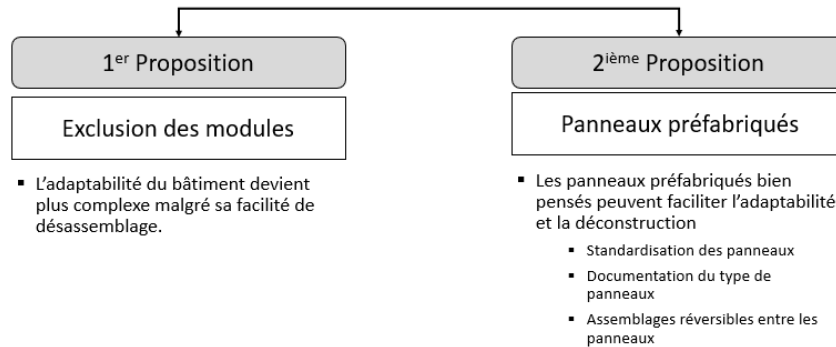
PROCÉDURE

- Envoyer un intrant aux intervenants en structure
 - ✓ Jean-Philippe Carrier pour la structure générale
 - 1) Plan de structure du bâtiment existant avec une classe sismique C
 - 2) Plan de structure du nouveau bâtiment avec classe sismique C ET une charge de 2,4 kPa
- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario 01
 - ✓ S'attendre à modifier l'onglet donnée structure, les hauteurs et la composition des murs de refend.
- Modification du BIM
 - ✓ Christian Glaude : ajuster les nouveaux niveaux
 - ✓ Camille : Prendre les nouvelles données du BIM et les traduire dans l'inventaire

6

SCÉNARIO 2 , DÉCONSTRUCTION : PRÉFABRICATION

SCÉNARIO 2 DÉCONSTRUCTION AVEC UNE EMPHASE SUR LE PRÉFAB



7

SCÉNARIO 2 , DÉCONSTRUCTION : PRÉFABRICATION

POINTS DISCUTÉS

▪ Dimensions standards ?

Hauteur: 8.6 pieds (analyser la hauteur du PAL)
Transport max hauteur possible des panneaux : 14 pieds ou 12 pieds
Largeur: Multiple de 4 (4, 8, 12 et 16)
Utiliser le métrique (mm)

- Composition des panneaux
 - Conserver la composition des murs et cloisons
- Étudier l'encastrement au niveau des ouvertures (effets linteaux)
- Documentation détaillée (SW1,C1,E1)

▪ Stratégies de connexion des murs

- Plaques et double lisses (optionnelle)
 - Tout dépend de la largeur du mur
 - Plaque sur le côté à l'extérieur
- Fixation rigide (planchers-murs)?
 - Oui (vis à grosse tête avec 3po de long)

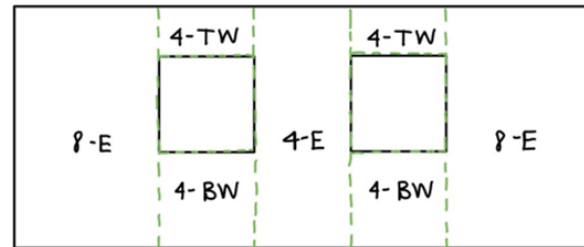
8

SCÉNARIO 2 , DÉCONSTRUCTION : PRÉFABRICATION

CONCLUSIONS

Dimensionnement standard

- Largeur varie en intervalles de 4' (1200mm)
- Hauteur max. 12' (3650mm) ou 14' (4260mm) avec une escorte routière.
- Composition des murs préfabriqués = même que murs existants
- Nomenclature permanente sur les panneaux
 - E : Exterior wall
 - SW : Shearing wall
 - BW ou TW : Bottom window ou Top window
- Documentation détaillée



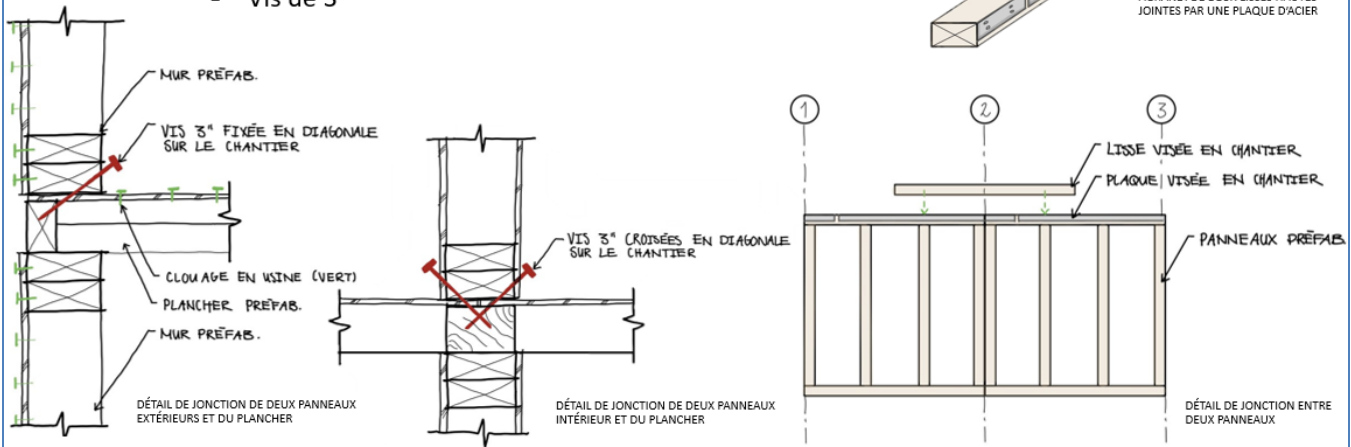
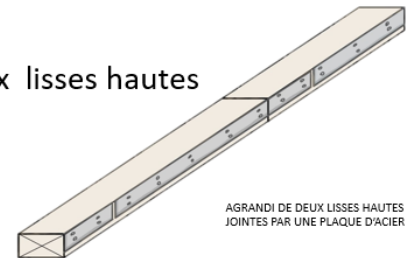
9

SCÉNARIO 2 , DÉCONSTRUCTION : PRÉFABRICATION

CONCLUSIONS

Connexion des murs

- Plaque en acier posée en chantier superposant deux lisses hautes
 - Posées sur le côté extérieur du mur
- Fixation rigide au plancher
 - Vis de 3"

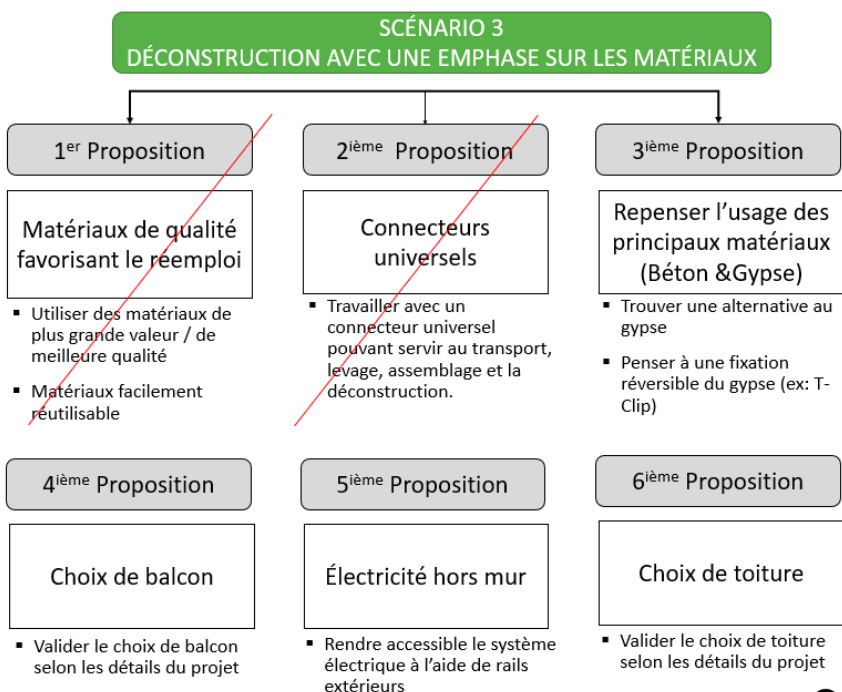


SCÉNARIO 2 , DÉCONSTRUCTION : PRÉFABRICATION PROCÉDURE

- ❑ Compartimer les murs en sections de panneaux
 - ✓ Utiliser les plans PDF ou BIM
 - ✓ Répertoire la quantité de panneaux
- ❑ Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario 02
 - ✓ Ajouter l'acier des plaques (Périmètre du bâtiment + longueur des murs de refend)
 - ✓ Ajouter un colombage à chaque jonction de panneau
- ❑ Modification du BIM
 - ✓ Aucune modification

11

SCÉNARIO 3 , DÉCONSTRUCTION : MATÉRIAUX



12

SCÉNARIO 3 , DÉCONSTRUCTION : MATÉRIAUX

CONCLUSIONS

- Solution gypse? (03-3.1) et (03-3.2)
 - Utiliser une finition en MDF pour les cloisons
 - Vérifier les performances acoustiques des planchers avant d'envisager la réduction des couches de gypse
 - Comparer l'ITS du code (PAL actuel) et stratégies proposées
 - Analyser la contribution de l'isolant à l'acoustique (à valider le type d'isolant: cellulose ou la laine de roche ou laine minérale?)

- Dalle sèche (Fermacell)? (03-3.3)
 - Évaluer l'impact du fermacell (voir avec sylvain expert dans le domaine)

- Solution balcon? (03-4)
 - En colonne à 6 pieds et plus
 - Sinon, en porte-à-faux

- Toiture? (03-6)
 - Toiture conventionnelle avec fixations mécaniques (avantageux)
Comparativement aux toitures en bitumineuse)
 - Facile à réutiliser. Se pose sur isolant de pente ou solives en pente.

- Filage électrique (03-5)
 - Faire plus de recherche et valider par rapport au code canadien.

13

SCÉNARIO 3 , DÉCONSTRUCTION : MATÉRIAUX

PROCÉDURE

- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario **03-3.1**
 - ✓ Remplacer le gypse de la cloison A par du MDF
- Comparer P4 avec le code **03-3.2**
 - ✓ Trouver une composition similaire pour déterminer son ITS
 - ✓ Définir une composition ayant un ITS semblable et 1h de résistance au feu
- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario **03-3.2**
 - ✓ Créer une nouvelle composition pour le plancher P4
- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario **03-3.3**
 - ✓ Créer une nouvelle composition en Fermacell pour le plancher P4
- Discuter de la préfaisabilité des balcons en porte-à-faux **03-4**
 - ✓ Quantification complexe
- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario **03-5**
 - ✓ Ajouter le profilé de plastique/Bois recouvrant les fils. Design profilé
 - ✓ Valider la légalité de ce principe avec le code
- Prévoir une copie de l'inventaire pour le scénario **03-6**
 - ✓ Modifier la composition de la toiture T1
- Modification du BIM
 - ✓ Ajuster les niveaux si nécessaire

14

**ANNEXE III -
ADAPTATION DE LA STRUCTURE : SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE ET
SCÉNARIO ADAPTABILITÉ (L2C EXPERTS-CONSEILS EN
STRUCTURE)**

**ÉTUDE DE CAS DU BÂTIMENT
PAL6 - POINTE-AUX-LIÈVRES
-
L2C02191009**



**FPInnovations
Groupe Affaires réglementaires,
Durabilité et Développement
A/s Patrick LAVOIE**

**1055 rue PEPS,
Québec (QC) G1V 4C7
Tél : (418) 781-6745**





Lévis, le 28 mars 2020

FPInnovations
Groupe Affaires réglementaires, Durabilité et Développement
A/s Patrick Lavoie
1055 rue PEPS,
Québec (QC) G1V 4C7
Tél : (418) 781-8745

Transmis par courriel à : patrick.lavoie@foinnovations.ca

Objet :
Étude de cas du bâtiment PAL6 situé à Pointe-aux-Lièvres
Référence : L2C02191009

1. Nature du mandat

L'approche méthodologique consiste à modifier les plans existants du bâtiment en incorporant les principes Co-p-Dé, dans le but de comparer les scénarios de bâtiments modifiés avec le bâtiment original via des analyses de cycle de vie environnementales (ACV) et économiques (ACVE).

Cela étant dit, pour ce faire, les services professionnels de L2C Experts-Conseils ont été sollicités en tant que firme d'ingénierie professionnelle dans le domaine de la structure du bâtiment dans le but de modéliser et de concevoir de façon préliminaire un bâtiment dit adaptatif. Le but étant de déterminer la différence en quantité de matériaux nécessaires à la construction de ce type de bâtiment et réutilisable par rapport à celle réalisée pour le bâtiment PAL6 situé dans l'écoquartier Pointe-aux-Lièvres à Québec.

2. Description du bâtiment proposé

Le bâtiment proposé a été conçu afin de permettre un aménagement adaptatif pour plusieurs usages différents tout en étant conforme au CNBC 2010 et à la norme CSA O86-14.

Dans ce but, l'orientation des solives de plancher a été modifiée afin d'utiliser les murs extérieurs et de corridors comme seuls éléments porteurs. La portée des poutrelles étant ainsi augmentée, leur hauteur est passée de 302mm à un minimum de 533mm.

Toujours dans le but d'augmenter les possibilités d'aménagements des espaces, les murs de contreventements, appelés murs de refends, ont été repositionnés et redimensionnés en considérant une catégorie d'emplacement sismique "C". Des segments de murs de corridor, de murs extérieurs et de murs inter-unités ont été dimensionnés pour résister aux effets d'une secousse sismique ou de forts vents.

Finalement, les balcons ont été conçus de façon à être démontables et remplaçables. Des poutres en

porte-à-faux, appelées des “fourchettes” sont maintenant utilisées. De cette façon, ces balcons peuvent être ajoutés ou retirés du bâtiment et sont très adaptés à l’orientation des poutrelles de plancher. En effet, les éléments d’acier en porte-à-faux seront insérés entre les poutrelles de plancher.

3. Conception du système de résistance aux charges gravitaires du bâtiment proposé

L’approche utilisée pour la conception du système de résistance aux charges gravitaires a été d’utiliser les murs extérieurs ainsi que les murs du corridor comme appuis des fermes et des poutrelles du projet pour tout le projet. Les murs extérieurs servants d’enveloppe au bâtiment ont aussi été comptabilisés dans le projet. Au-dessus des ouvertures, les linteaux au-dessus des portes ainsi que leur jambage ont aussi été comptabilisés. L’approche utilisée a permis de maximiser les aires ouvertes en limitant au maximum le nombre d’éléments porteurs. Cette approche permet de rendre le bâtiment plus adaptatif puisque l’intérieur de celui-ci peut être remodelé au fil du temps selon l’usage qui lui est destiné.

Pour concevoir les éléments, les charges suivantes ont été utilisées :

- Charge morte du toit : 1,7 kPa ;
- Charge morte des planchers : 2,2 kPa ;
- Charge de neige : 3,48 kPa.
- Charge vive au plancher : 2,4 kPa ;

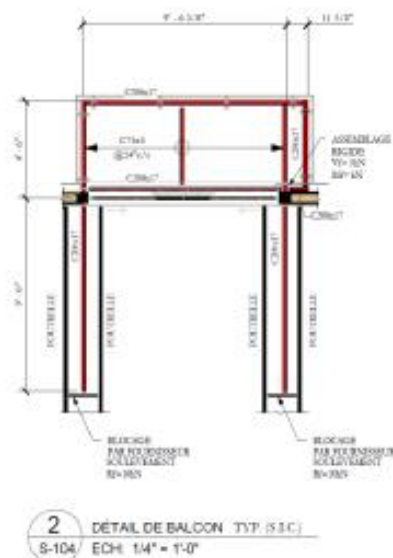
Les charges mortes du toit et du plancher ont été reprises du bâtiment de référence. La charge de neige, quant à elle, correspond à celle de la ville de Québec. La charge vive utilisée a été définie à 2,4 kPa, soit la charge vive correspondant à des bureaux selon le CNBC 2010. L’utilisation d’une charge vive de 2,4 kPa (bureaux) est supérieure à la charge typique d’un logement (1,9 kPa). Cependant, concevoir les éléments de la structure pour une charge de bureaux permet de pouvoir modifier l’usage du bâtiment. Le bâtiment est cependant réservé à la catégorie normale selon le CNBC 2010 (Le bâtiment ne peut donc pas servir d’école ou de centre communautaire, par exemple).

4. Conception du système de résistance aux charges latérales du bâtiment proposé

Concernant le système de résistance aux charges latérales, l’approche a été de se limiter au maximum aux murs étants déjà en place pour la reprise des charges gravitaires. L’idée est encore une fois de maximiser les aires ouvertes afin de rendre le bâtiment plus adaptatif. Néanmoins, comme la résistance aux charges latérales d’une structure en ossature légère de bois est assez limitée, certaines portions de murs ont dû être ajoutées afin d’obtenir un système étant à la fois assez résistant et suffisamment rigide pour assurer la sécurité des usagers du bâtiment. L’approche a été de procéder à une analyse dynamique de la structure afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement de la structure lors d’un séisme ou de forts vents. Cette tâche a été possible grâce à l’utilisation d’un logiciel d’analyse des structures. Les charges sismiques et de vent ont été établies à partir des directives du CNBC 2010 pour un emplacement sismique de catégorie C situé à Québec sur un terrain à découvert, c’est-à-dire un terrain susceptible d’être soumis à de forts vents.

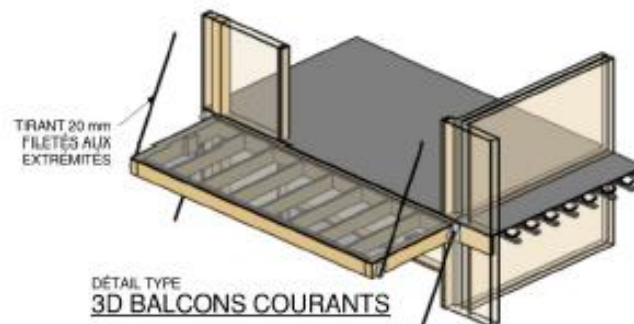
5. Balcons en porte-à-faux

Les balcons sont constitués d'éléments de structure d'acier, principalement fait de profilés en "C" conformes à la norme G40.21 de grade 300W. Deux éléments principaux en porte-à-faux, appelés les fourchettes, sont insérés entre deux poutrelles de plancher et fixé à un élément perpendiculaire pour assurer la résistance au soulèvement du bout de ces fourchettes. Pour le palier du balcon, un ensemble de poutrelles composées de profilés en "C75x5" et espacées de 610mm, sont fixées à deux poutres faites de profilés en C200x17.



6. Balcons existants

Les balcons existants sont constitués d'éléments de structure d'ossature légère de bois intégrant un système de tirants d'acier fixés au bout du balcon et au bâtiment existant.



Le mandat de L2C étant de déterminer la quantité d'acier nécessaire à la construction de ces balcons, voici les résultants de calculs :

Gousset haut				
mm	mm	mm	m ³	kg
204	204	6	0,0002	1,96
228	150	20	0,0007	5,37

Gousset bas				
mm	mm	mm	m ³	kg
200	90	16	0,0003	2,26
200	90	16	0,0003	2,26
88	90	16	0,0001	0,99
200	120	6	0,0001	1,13

Tirant				
d	A	I	m ³	kg
20	314,159265	3500	0,0011	8,63

Total par tige	23 kg
Total par balcon	45 kg/balcon

7. Conclusion et limitation

Le présent rapport présente la démarche qui a permis de concevoir le bâtiment afin de permettre un aménagement adaptatif pour plusieurs usages différents tout en étant conforme au CNBC 2010 et à la norme CSA O86-14. Les différents éléments du système de résistance gravitaire, latérale et permettant la construction des balcons y sont présentés. Finalement, la quantité d'acier nécessaire à la construction des balcons existants a été déterminée.

Il est à noter que le présent mandat se limite à la conception et au dimensionnement préliminaire dans l'unique but de vous permettre de déterminer la quantité de matériaux requis pour réaliser une construction adaptative. Seuls les éléments énumérés ont été conçus et aucun essai en place ou en laboratoire n'a été réalisé.



8. Codes, normes et références utilisés

CNRC — Conseil national de recherches Canada
Code national du bâtiment — Canada, 2010 (CNB)

CSA — Association Canadienne de Normalisation
CSA O86-14 - Règles de calcul des charpentes en bois

9. Annexes

1. Vue en plan des éléments du système de résistance aux charges gravitaires du bâtiment proposé.
2. Vue en plan des éléments du système de résistance aux charges latérales du bâtiment proposé.

Nous demeurons disponibles pour toutes questions et espérons avoir répondu adéquatement à vos besoins. En espérant le tout conforme à vos attentes, nous vous prions d'agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments distingués.

Jean-Philippe Carrier, ing.

OIQ#147077

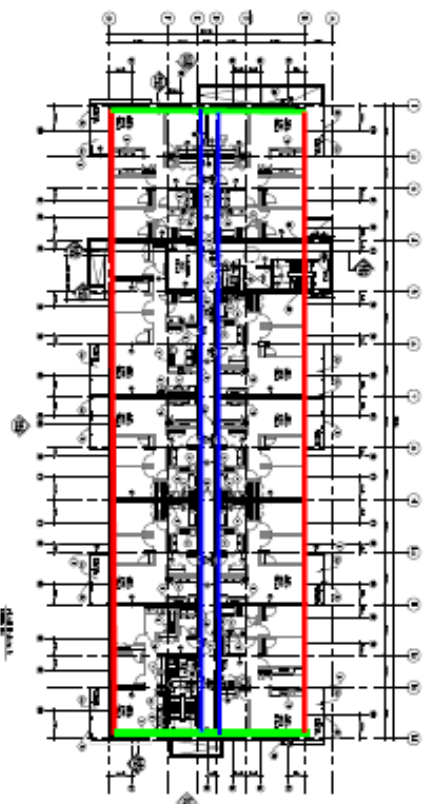
Associé principal - Ingénieur en structure
jpcarrier@L2Cexperts.com

Julien Leclerc, ing.

OIQ#5042381

Ingénieur en structure
jleclerc@L2Cexperts.com

CHANGEMENT DE CONCEPTION
 Changement mode au lot 1-17-07
 Changement mode au lot 1-20-07 (Quadrant)
 Changement mode au plancher 2-20-07
 Changement mode au plancher 2-01-07
 Lot
 6 (Lot) = 0-01-07 (Quadrant)



Plan d'acier pour le plancher

Étage	Moment	Exp. positive	Exp. nég.	Épais. de dalle
4	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
4	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
3	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
2	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
1	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0

Plan d'acier pour le plancher

Étage	Moment	Exp. positive	Exp. nég.	Épais. de dalle
4	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
3	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
2	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0
1	30	40 880.0 E	30 750.0 N	150.0

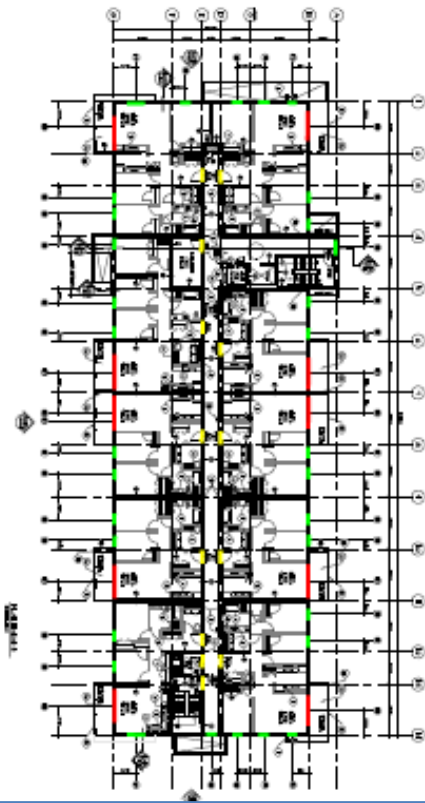


Tableau de ferraillage

Étage	Lot	Dimension	Moment	Exp. positive	Exp. nég.	Épais. de dalle
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0

Dimensionner pour les colonnes, l'exp. nég. au lot 1-20-07

Étage	Lot	Dimension	Moment	Exp. positive	Exp. nég.	Épais. de dalle
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0
4	1	3.00 LxV. 2.00 0.12'	3.24	40 750.0 E	30 750.0 N	150.0

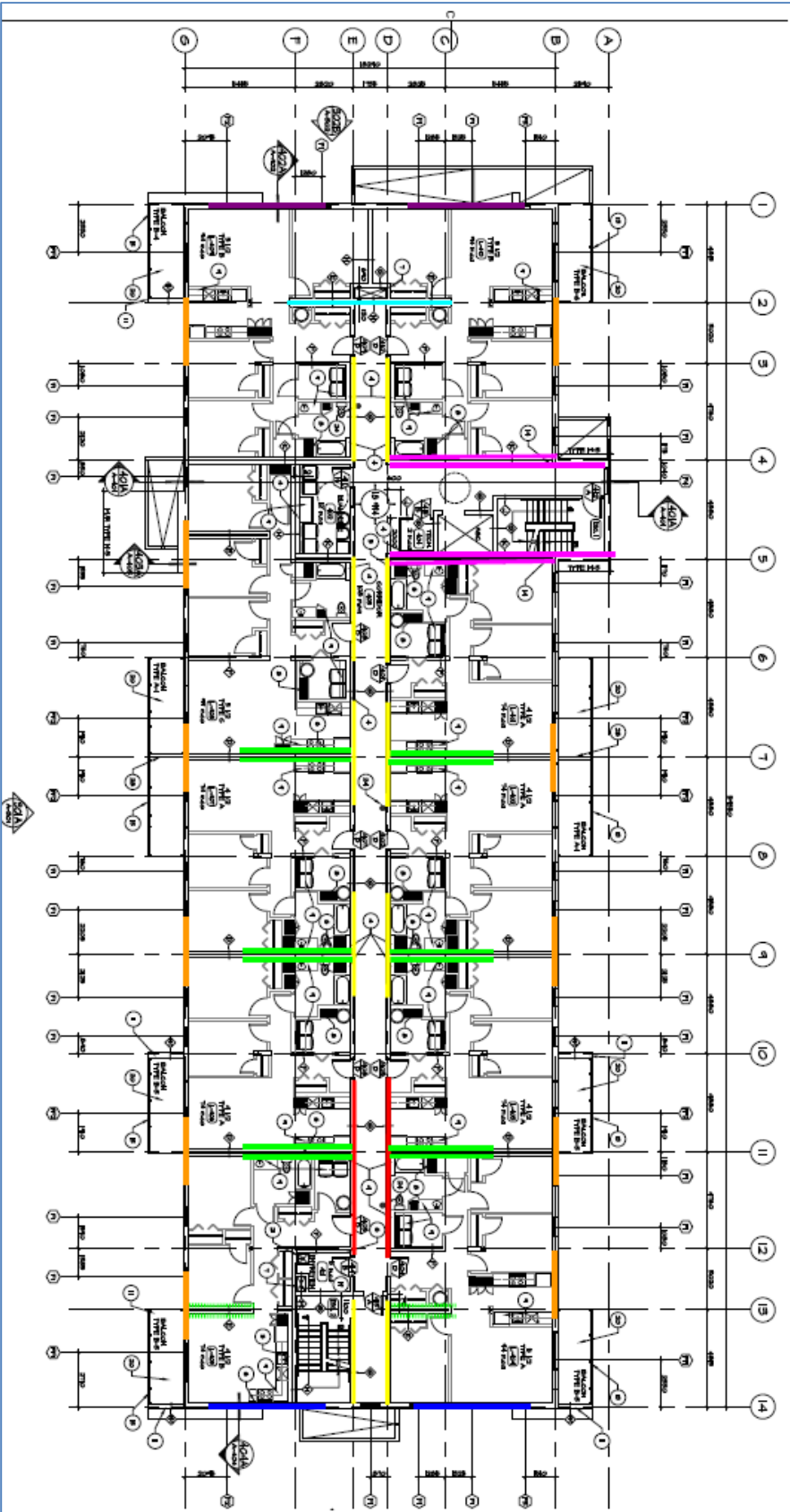
ZC
 EXPERTS CONSULTS EN STRUCTURE
 906, chemin Olivier
 Suite 350
 Lévis, Qc
 G7A 2N1
 Tél. : 418 406-0811
 info@ZCexperts.com

— Mur mitoyen (Mur isolé) avec parement sur chacun des murs

Étage	Panneau	Clouage
6	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 6" c/c
5	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 4" c/c
4	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 4" c/c
3	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
2	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
1	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c

Étage	Panneau	Clouage
6	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 6" c/c
5	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 4" c/c
4	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 4" c/c
3	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
2	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
1	1 - OSB 7/16"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c

Étage	Panneau	Clouage
6	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 4" c/c
5	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
4	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
3	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
2	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c
1	1 - OSB 5/8"	2 1/2" x 0.131" @ 3" c/c





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

info@fpinnovations.ca
www.fpinnovations.ca