

ÉVALUATION DES CONSTRUCTIONS À HAUTE EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE CONTEXTE QUÉBÉCOIS

*DÉVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES SUR LES
MATÉRIAUX À FAIBLE EMPREINTE CARBONE*

PARTENAIRES FINANCIERS

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 


Fondsvert

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

.....
Juin 2019

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

REMERCIEMENTS

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

**ÉVALUATION DES CONSTRUCTIONS À HAUTE EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE DANS LE CONTEXTE QUÉBÉCOIS
DÉVELOPPEMENT DES CONNAISSANCES SUR LES
MATÉRIAUX À FAIBLE EMPREINTE CARBONE**

PROJET NUMÉRO : 301013611

APPROBATEUR
Vincent Blanchard, Ph.D., G.D.B.A.
Gestionnaire
Groupe Affaires Réglementaires
Vincent.Blanchard@fpinnovations.ca

RÉVISEUR
François Charron-Doucet, ing., M.Sc.A
Directeur scientifique
Responsabilité d'entreprise
Groupe AGECO

INFORMATION DE L'AUTEUR
Dieudonné Romaric Batsy, Ph.D.
Chercheur
Groupe Affaires Réglementaires
418-781-6745
Dieudonne.Batsy@fpinnovations.ca

AVERTISSEMENT

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

Suivez-nous :   

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	1
1. INTRODUCTION.....	3
1.1 OBJECTIF GLOBAL DU PROJET	5
1.2 DESCRIPTION DE L'ÉTUDE DE CAS ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	5
1.2.1 Scénario de base : Bibliothèque de Varennes	6
1.2.2 Scénario conventionnel : bibliothèque sans technologies net-zéro.....	7
1.2.3 Scénario bois : Bibliothèque de Varennes avec structure en bois.....	7
1.2.4 Scénario bois ⁺ : Bibliothèque de Varennes optimisée	7
2. ANALYSE DE CYCLE DE VIE	7
2.1 OBJECTIFS ET CHAMP D'ÉTUDE.....	8
2.1.1 Objectifs	8
2.1.2 Hypothèses	9
2.1.3 Raisons de l'étude	9
2.1.4 Importance et pertinence	9
2.1.5 Audience visée	9
2.1.6 Applications prévues et portée de l'étude	10
2.2 CHAMP DE L'ÉTUDE.....	10
2.2.1 Description du système à l'étude : bibliothèque de Varennes.....	10
2.2.2 Bâtiment net-zéro : conception et aspects techniques	10
2.2.3 Bâtiment net-zéro optimisé	13
2.2.4 Fonction et unité fonctionnelle	14
2.2.5 Frontières du système à l'étude	14
2.2.6 Critères de délimitation de l'étude	16
2.2.7 Sources de données	17
2.2.8 Qualité des données	17
2.2.9 Méthode d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts.....	17
2.2.9.1 TRACI	17
2.2.9.2 Réchauffement climatique.....	18
2.2.9.3 Appauvrissement de la couche d'ozone	18
2.2.9.4 Formation de smog photochimique.....	18
2.2.9.5 Acidification.....	18
2.2.9.6 Eutrophisation	18
2.2.9.7 Écotoxicité	19
2.2.9.8 Effets respiratoires	19
2.2.9.9 Épuisement des ressources fossiles	19
2.2.10 Logiciel utilisé pour la modélisation et calculs.....	19

2.2.11	Interprétations des résultats	19
2.2.12	Considération des limites de l'étude	19
2.2.13	Revue critique	20
2.3	INVENTAIRES ET MODÉLISATION DANS SIMAPRO.....	20
2.3.1	Approche de collecte de données	20
2.3.1.1	Collecte de données.....	20
2.3.1.2	Base de données Ecoinvent	20
2.3.1.3	Collaboration et ateliers de recherche.....	21
2.3.2	Étape de production	21
2.3.3	Étape de construction.....	22
2.3.3.1	Transport (A4)	22
2.3.3.2	Construction (A5)	23
2.3.4	Étape d'opération	27
2.3.4.1	Réparation (B3)	27
2.3.4.2	Remplacement (B4).....	27
2.3.4.3	Utilisation d'énergie (B6)	29
2.3.5	Étape de fin de vie du bâtiment.....	30
2.3.5.1	Démolition du bâtiment (C1)	31
2.3.5.2	Transport des matériaux vers les centres de triage, de recyclage ou de revalorisation (C2) ...	33
2.3.5.3	Triage au centre de Tri (C3).....	34
2.3.5.4	Gestion et élimination.....	34
2.3.6	Inventaire des éléments actifs du net-zéro	35
2.3.6.1	Procédé géothermique.....	36
2.3.6.2	Bilan énergétique et inventaire du procédé géothermique	36
2.3.6.3	Procédé photovoltaïque.....	38
2.3.6.4	Bilan d'énergie et inventaire du procédé photovoltaïque	38
2.3.6.5	Système de roues thermiques.....	39
2.3.6.6	Bilan d'énergie et inventaire du système de roues thermiques	39
2.3.7	Analyse de la qualité de données et modélisation des processus.....	41
2.3.7.1	Analyse de l'inventaire et agrégation des données	41
2.3.7.2	Qualité des données primaires et analyse qualitative de l'incertitude	41
2.3.7.3	Évaluation qualitative des données primaires secondaires	42
2.3.7.4	Effets des incertitudes sur les résultats	44
3.	ANALYSE D'IMPACTS ET RÉSULTATS.....	54
3.1	ANALYSE D'IMPACTS SELON LES OBJECTIFS DE CHAQUE SCÉNARIO.....	54
3.1.1	Résultats du bâtiment net-zéro tel que construit.....	54

3.1.2	Résultats du bâtiment conventionnel.....	56
3.1.1.	Résultats du bâtiment ayant une structure en bois	57
3.1.3	Résultats associés au bâtiment bois Plus (bois+).....	58
3.2	ANALYSE APPROFONDIE DES RÉSULTATS SELON LES OBJECTIFS GÉNÉRAUX.....	59
3.2.1	Analyse d’impacts du bâtiment net-zéro tel que construit	59
3.2.1.1	Analyse de la consommation énergétique à l’étape d’opération.....	59
3.2.1.2	Analyse de contribution aux impacts du bâtiment net-zéro tel que construit.....	61
3.2.2	Analyse d’impacts du bâtiment conventionnel	62
3.2.3	Analyse d’impacts du bâtiment à structure en bois	63
3.2.4	Analyse d’impacts scénarios bois ⁺	63
3.2.5	Analyse de contribution de l’étape de production des matériaux dans le bâtiment tel que construit.....	65
3.2.6	Analyse d’impacts de la consommation des matériaux (A1-A3, B3 et B4).....	65
3.2.7	Analyse comparative des émissions intrinsèques des matériaux et les émissions de l’énergie d’opération en fonction des scénarios définis	66
3.2.8	Synthèse et analyse comparative des impacts	67
3.2.9	Analyse de sensibilité et robustesse des résultats	68
3.2.9.1	Usage du gaz naturel dans le bâtiment conventionnel.....	68
3.2.9.2	Analyse de sensibilité autour du mix électrique de l’Alberta et l’Ontario	70
3.2.9.3	Analyse de sensibilité autour des processus modélisés avec la base de données US LCI	72
3.2.9.4	Analyse de sensibilité et pertinence des résultats sous IMPACT 2002+	75
4.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	78
5.	LIMITATIONS.....	80
6.	RÉFÉRENCES.....	81
	ANNEXE 1 - PHASE D’ANALYSE DE CYCLE DE VIE	85
6.1	DÉFINITION DE L’OBJECTIF ET DU CHAMP DE L’ÉTUDE	86
6.2	L’INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE (ICV)	86
6.3	ÉVALUATION DE L’IMPACT DU CYCLE DE VIE (ÉICV)	87
6.4	INTERPRÉTATION	87
	ANNEXE 2 – INVENTAIRE AGRÉGÉ.....	88
	ANNEXE 3 – DÉTAILS DES INVENTAIRES.....	91
	ANNEXE 4 – RECONCEPTION DE LA STRUCTURE	115
	ANNEXE 5 – RECONCEPTION DE L’ENVELOPPE.....	159
	ANNEXE 6 – MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE	166
	ANNEXE 7 – LES CATÉGORIES D’IMPACTS SELON LA MÉTHODE TRACI ET LA MÉTHODE IMPACT 2002+	192

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Demande énergétique par secteur au Québec en 2015 [3]	4
Figure 2.	Émissions par secteur au Canada en 2015 [2]	4
Figure 3.	Scénarios comparatifs à l'étude.....	5
Figure 4.	Phases de l'analyse de cycle de vie [8]	8
Figure 5 :	Illustration de la maquette du bâtiment en vue aérienne	13
Figure 6.	Frontières du système	15
Figure 7.	Flux énergétiques du bâtiment actuel (source : Martin Roy & Associés (MRA)).....	30
Figure 8.	Comparaison de la distribution des besoins énergétiques des deux types de bâtiments (Source MRA)	37
Figure 9.	Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération	55
Figure 10.	Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération	56
Figure 11.	Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération	56
Figure 12.	Illustration des impacts de matériaux dans la comparaison des deux bâtiments.....	57
Figure 13.	Illustration comparative des impacts totaux du bâtiment actuel et ceux du bâtiment en bois	57
Figure 14.	Illustration comparative des impacts totaux du bâtiment actuel et ceux du bâtiment en bois et plus (bois+).....	58
Figure 15.	Illustration des émissions associées à la production d'électricité alimentant le bâtiment.....	59
Figure 16.	Comparaison des impacts de deux procédés de production d'électricité	60
Figure 17.	Comparaison des impacts de l'énergie utilisée à l'étape d'opération des bâtiments.....	61
Figure 18.	Analyse de contribution des scénarios	64
Figure 19.	Analyse de contribution de l'étape de production des matériaux (A1-A3).....	65
Figure 20	Illustration comparative des impacts liés à la consommation des matériaux (A1-A3, B3 et B4)	66
Figure 21.	Évolution des distributions des émissions des matériaux et celles de l'étape d'opération.....	66
Figure 22.	Illustration du potentiel de réduction des impacts par le net-zéro au Québec	67
Figure 23.	Illustration de la comparaison des scénarios avec le scénario conventionnel alimenté au gaz naturel.....	70
Figure 24.	Illustration comparative des émissions associées au kilowattheure produit en Alberta, en Ontario et au Québec.....	70
Figure 25.	Illustration du potentiel de réduction des impacts avec le net-zéro en Ontario.....	71
Figure 26.	Illustration du potentiel de réduction des impacts avec le net-zéro en Alberta	72
Figure 27.	Impacts totaux de cycle de vie des scénarios modélisé de manière cohérente sous une même base de données	74
Figure 28.	Comparaison des impacts totaux de cycle de vie des scénarios selon la méthode IMPACT 2002+	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Synthèse des modifications et différences entre scénarios	6
Tableau 2.	Critères de conception [9, 11, 12].....	12
Tableau 3.	Éléments du bâtiment exclus des frontières du système à l'étude.....	16
Tableau 4.	Indicateurs environnementaux considérés	17
Tableau 5.	Principaux fournisseurs et distances	22
Tableau 6.	Transport (A4).....	22
Tableau 7.	Facteurs de rejet de construction.....	24
Tableau 8.	Inventaire des matériaux.....	25
Tableau 9.	Matériaux de réparation et inventaire	27
Tableau 10.	Durée de vie de référence	28
Tableau 11.	Inventaire des matériaux remplacés	29
Tableau 12.	Bilan énergétique (source MRA).....	30
Tableau 13.	Poids total des matériaux après démolition	31
Tableau 14.	Énergies de démolition en fonction du type de structure.....	31
Tableau 15.	Énergie de démolition.....	33
Tableau 16.	Transport des débris (acier, bois, béton).....	33
Tableau 17.	Transport vers le centre de tri	34
Tableau 18.	Énergies de triage au centre de tri.....	34
Tableau 19.	Distribution du tonnage en vrac au sortir du centre de tri.....	35
Tableau 20.	Transport de la matière résiduelle vers le site de disposition.....	35
Tableau 21.	Liste d'éléments actifs du net-zéro.....	36
Tableau 22.	Bilan d'énergie du procédé géothermique	38
Tableau 23.	Inventaire du procédé géothermique (source : Ecoivent v3.3)	38
Tableau 24.	Inventaire du procédé photovoltaïque (source : Ecoivent v3.3, Report [47]).....	39
Tableau 25.	Bilan d'énergie du procédé de roues thermiques	39
Tableau 26.	Inventaire du procédé de la roue thermique (source : Ecoivent v3.3).....	40
Tableau 27.	Suite de l'inventaire du procédé de la roue thermique (source : Ecoivent v3.3).....	40
Tableau 28.	Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al.[51]).....	43
Tableau 29.	Critères évaluation qualitative de la qualité des données (adaptés de Weidema et al.[51])	43
Tableau 30.	Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative.....	44
Tableau 31.	Données agrégées.....	45
Tableau 32.	Analyse de contribution massique et pertinence du critère seuil.....	46
Tableau 33.	Analyse de la qualité des données primaires (A1 –A3).....	47
Tableau 34.	Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3)	48
Tableau 35.	Analyse de la qualité des données primaires (A4, B3, B4).....	49
Tableau 36.	Analyse de la qualité des données secondaires (A4, B3, B4).....	50
Tableau 37.	Analyse de la qualité des données primaires (B6).....	51

Tableau 38. Analyse de la qualité des données secondaires (B6)	51
Tableau 39. Analyse de la qualité des données primaires (C1-C3).....	52
Tableau 40. Analyse de la qualité des données secondaires (C1-C3).....	53
Tableau 41. Analyse de contribution du bâtiment net-zéro tel que construit.....	62
Tableau 42. Analyse de contribution du bâtiment conventionnel	63
Tableau 43. Paramètres et justifications des analyses de sensibilité.....	68
Tableau 44. Liste des matériaux ayant été modélisés avec USLCI (extrait du Tableau 34).....	72
Tableau 45. Analyse de la variation extrême des paramètres de sensibilité entre scénarios	73
Tableau 46. Processus de sensibilité identifiés dans Ecoinvent 3.3	73
Tableau 47. Inventaire pour la production d’1kg d’isolant en panneau de fibre de bois (source FPIinnovations [54])	73
Tableau 48. Modélisation de l’isolant en panneau de fibre de bois et choix des processus dans Ecoinvent 3.3	74

LISTE DE TABLEAUX DES ANNEXES

Tableau Annexe 1. Sommaire des inventaires – partie 1.....	89
Tableau Annexe 2. Sommaire des inventaires – partie 2.....	89
Tableau Annexe 3. Sommaire des inventaires – partie 3.....	90
Tableau Annexe 4. Sommaire des inventaires béton et armatures.....	92
Tableau Annexe 5. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 1.....	93
Tableau Annexe 6. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 2.....	94
Tableau Annexe 7. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 3.....	95
Tableau Annexe 8. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 4.....	96
Tableau Annexe 9. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 5.....	97
Tableau Annexe 10. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 6.....	98
Tableau Annexe 11. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 7.....	99
Tableau Annexe 12. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 8.....	100
Tableau Annexe 13. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 9.....	101
Tableau Annexe 14. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 10.....	102
Tableau Annexe 15. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 11.....	103
Tableau Annexe 16. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 12.....	104
Tableau Annexe 17. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 13.....	104
Tableau Annexe 18. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 14.....	105
Tableau Annexe 19. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 15.....	106
Tableau Annexe 20. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 16.....	107
Tableau Annexe 21. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 17.....	108
Tableau Annexe 22. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 18.....	109
Tableau Annexe 23. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 19.....	110

Tableau Annexe 24.	Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 20.....	111
Tableau Annexe 25.	Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 21.....	112
Tableau Annexe 26.	Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 22.....	112
Tableau Annexe 27.	Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 23.....	113
Tableau Annexe 28.	Détails inventaires des luminaires	114
Tableau Annexe 29.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 1	160
Tableau Annexe 30.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 2	161
Tableau Annexe 31.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 3	162
Tableau Annexe 32.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 4	163
Tableau Annexe 33.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 5	164
Tableau Annexe 34.	Modification des éléments de l’enveloppe – partie 6	165
Tableau Annexe 35.	Catégories d’impacts selon la méthode TRACI.....	192
Tableau Annexe 36.	Catégories d’impacts selon la méthode IMPACT 2002+	192

SOMMAIRE

Cette étude, initiée dans le cadre d'un programme de développement de connaissances sur les matériaux à faible empreinte environnementale, a permis d'analyser les impacts de cycle de vie d'un édifice institutionnel net-zéro au Québec. L'évaluation d'impact a permis de mettre en évidence le potentiel de réduction des impacts associé à l'application du concept net-zéro. Quatre scénarios ont été définis et analysés dont le scénario de base (bâtiment tel que construit), le scénario conventionnel, le scénario ayant une structure en bois (scénario bois) et le scénario ayant bien plus qu'une structure en bois (scénario bois+).

Le scénario de base a permis de comparer les impacts de la production des matériaux avec les impacts de l'énergie servant à l'opération du bâtiment sur 60 ans. De cette comparaison, il est ressorti que le bâtiment net-zéro consomme beaucoup de matériaux lesquels contribuent jusqu'à 70 % des impacts du cycle de vie du bâtiment (la fin de vie n'étant pas pris en compte). Les autres 30 % sont crédités à la consommation énergétique durant l'étape d'utilisation du bâtiment. Le scénario conventionnel a permis de comparer les impacts attribuables à la production des matériaux entre le bâtiment de base net-zéro et son équivalent conventionnel. De cette comparaison, il est ressorti que la consommation des matériaux supplémentaires par le net-zéro pour répondre aux exigences normatives entraîne des émissions supplémentaires de 3 % par rapport au bâtiment conventionnel. Le scénario bois qui intègre du bois en remplacement de l'acier structural a permis de mettre en exergue les bénéfices de l'inclusion du bois dans la construction de bâtiments. De cette analyse il est ressorti que l'inclusion du bois entraîne une réduction de 10 % d'émissions de GES par rapport au bâtiment tel que construit, soit 230 tonnes équivalent CO₂ évités par rapport au bâtiment tel que construit. Le scénario bois+ a permis de comparer les impacts du scénario de base avec les impacts du bâtiment net-zéro doté de matériaux sobres en carbone et de systèmes actifs optimisés. De cette intégration combinée a découlé une réduction de 50 % d'émissions GES par rapport au cas de base, soit 1 180 tonnes équivalent CO₂ évités par rapport au bâtiment tel que construit.

L'analyse des impacts de la production des matériaux dans le scénario de base a montré que l'acier et l'aluminium sont les deux principaux contributeurs aux impacts de cette étape. Ainsi, l'intégration graduelle des matériaux sobres en carbone, en remplacement de l'acier et de l'aluminium a pour conséquence l'amélioration des performances environnementales des scénarios concernés.

L'étude a montré que la qualité de l'électricité consommée par les bâtiments analysés et l'empreinte environnementale de celle-ci influencent les impacts du cycle de vie. Ainsi, l'électricité du Québec, étant une source d'énergie à très faible empreinte environnementale comparativement au système photovoltaïque installé sur site, neutralise les efforts de réduction d'impacts pouvant découler du net-zéro. Toutefois, la considération d'une alimentation combinée du bâtiment conventionnel (en électricité pour l'éclairage et en gaz naturel pour les besoins de chauffage) a montré que les émissions d'un bâtiment conventionnel pouvaient dépasser de 13 % les émissions du net-zéro. En absolu, cela représente 350 tonnes équivalent CO₂ évités par rapport au bâtiment conventionnel alimenté au gaz naturel et à l'hydroélectricité.

Finalement, une analyse de sensibilité a permis de contextualiser les résultats obtenus selon le contexte du Québec en les comparant avec ceux d'autres provinces comme l'Alberta et l'Ontario. Les résultats ont montré que les bénéfices environnementaux associés à l'intégration du concept net-zéro sont très importants, et ce, même sans la considération des matériaux sobres en carbone. D'ailleurs, les bénéfices environnementaux observés par l'intégration des matériaux sobres au Québec sont dilués, sinon éclipsés en Alberta et en Ontario, à

cause de l'amplitude et la magnitude des émissions globales d'un bâtiment dans ces deux provinces. En poussant un peu plus loin l'analyse de sensibilité, celle-ci a permis de tester la pertinence des données secondaires, de comparer les méthodes d'évaluation d'impacts et de valider aussi bien la robustesse des résultats que la certitude des conclusions formulées.

À la lumière de ces analyses, les améliorations environnementales escomptées, pouvant découler du concept net-zéro, dépendent largement du contexte régional. Par conséquent, les bénéfices environnementaux de l'intégration des technologies net-zéro seront plus élevés lorsque l'implantation est faite dans une région ayant bouquet énergétique à très forte intensité en carbone (ex : en Alberta, voir Figure 26). En revanche, les bénéfices environnementaux de l'intégration des technologies net-zéro seront modérés dans une région où le mix énergétique est à moyenne intensité en carbone (ex : Ontario, voir Figure 25). Dans un contexte comme celui du Québec, les constructions selon le concept net-zéro ne peuvent produire de véritables bénéfices environnementaux qu'en associant aux mesures passives et actives, la considération des matériaux sobres en carbone.

Somme toute, il sied de souligner que la poursuite de l'atteinte des hautes performances du net-zéro dans un bâtiment pourrait impliquer le déplacement des impacts environnementaux du bâtiment vers d'autres étapes du cycle de vie, en l'occurrence vers l'étape de production et de transport des matériaux. De fait, l'évaluation des performances opérationnelles d'un bâtiment net-zéro ne devrait pas être dissociée de l'approche cycle de vie globale du bâtiment. Cela dit, il paraît tout à fait important d'avoir une pensée cycle de vie, en intégrant dès l'étape de la préconception des bâtiments, une analyse de cycle de vie dans les choix de conception pour soutenir le développement et déploiement des bâtiments durables sans tomber dans le piège du déplacement des impacts vers d'autres étapes.

1. INTRODUCTION

Le secteur de la construction est un secteur d'activité important qui contribue significativement à la prospérité économique du Québec. C'est un secteur qui est considéré au rang des plus gros employeurs et qui procure environ 245 800 emplois directs en moyenne par mois, soit un emploi sur 20 au Québec. En 2017, les activités du secteur ont frôlé les 47 milliards de dollars de dépenses d'investissements, soit 12 % du PIB québécois [1].

Le cycle de vie des bâtiments qui inclut la fabrication des matériaux de construction, la construction des bâtiments et la phase d'utilisation est responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de la demande énergétique provinciale. En effet, la demande énergétique découlant des bâtiments résidentiels et commerciaux est estimée à 40 % de la demande provinciale excluant l'électricité (voir Figure 1). Les émissions de GES associées spécifiquement à la consommation énergétique des bâtiments, excluant celle relative à la consommation d'électricité, sont, quant à elles, estimées à 16 % des émissions de la province de Québec [2, 3] (voir Figure 2).

L'atteinte des objectifs de réduction de GES telle qu'énoncée par le gouvernement du Québec dans son plan d'action de lutte contre les changements climatiques (PACC 2013-2020) nécessiterait la mise en pratique des différentes mesures de réduction stipulée dans le PACC. Les mesures et initiatives concrètes qui prennent en compte la réduction des émissions et des énergies intrinsèques des matériaux sont nécessaires pour accompagner ce plan d'action [4]. Le présent projet s'inscrit dans le cadre du programme provincial, visant le développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone au Québec, lequel pourrait ainsi aider la province à réduire ses émissions en faisant bon usage des matériaux.

Le gouvernement du Québec considère que l'intégration des matériaux sobres en carbone en carbone ainsi que la considération des technologies relatives aux énergies renouvelables «net-zéro¹» dans le secteur de la construction sont des occasions pouvant permettre à la province d'atteindre plus facilement son objectif de réduction des GES. Toutefois, il est pertinent d'étudier dans quelle mesure l'intégration du net-zéro est une option intéressante dans le contexte québécois. Le Québec est dans un contexte particulier, où la principale énergie alimentant les bâtiments est de l'hydroélectricité, reconnue comme étant une source d'énergie à très faible empreinte environnementale (voir Figure 2). Il est donc pertinent d'étudier l'impact des matériaux dans sur le cycle de vie des bâtiments net-zéro au Québec. Certaines études, réalisées dans le contexte européen, démontrent que les bâtiments net-zéro consomment en général une plus grande quantité de matériaux que les bâtiments conventionnels, contribuant ainsi à hauteur de 56 % des impacts totaux des bâtiments [5].

¹ Net-zéro est un concept qui fait référence à un bilan énergétique annuel nul, c'est-à-dire que la consommation survenant durant l'hiver par exemple est compensée par une production d'énergie (retournée au réseau) durant les mois d'été. Les émissions GES ne sont pas prises en compte dans cette perspective.

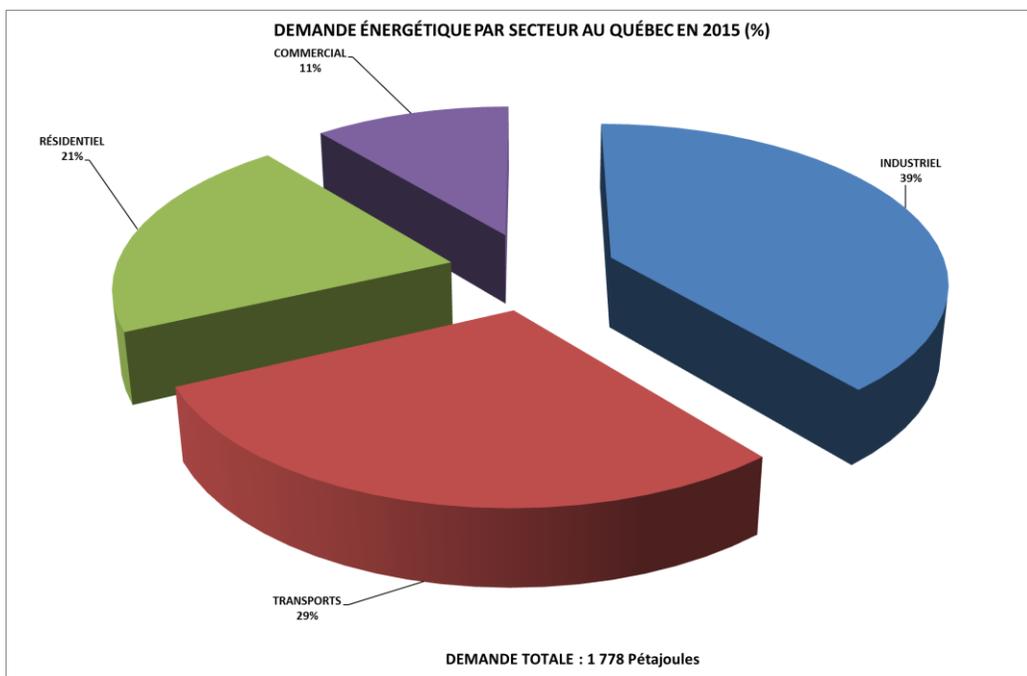


Figure 1. Demande énergétique par secteur au Québec en 2015 [3]

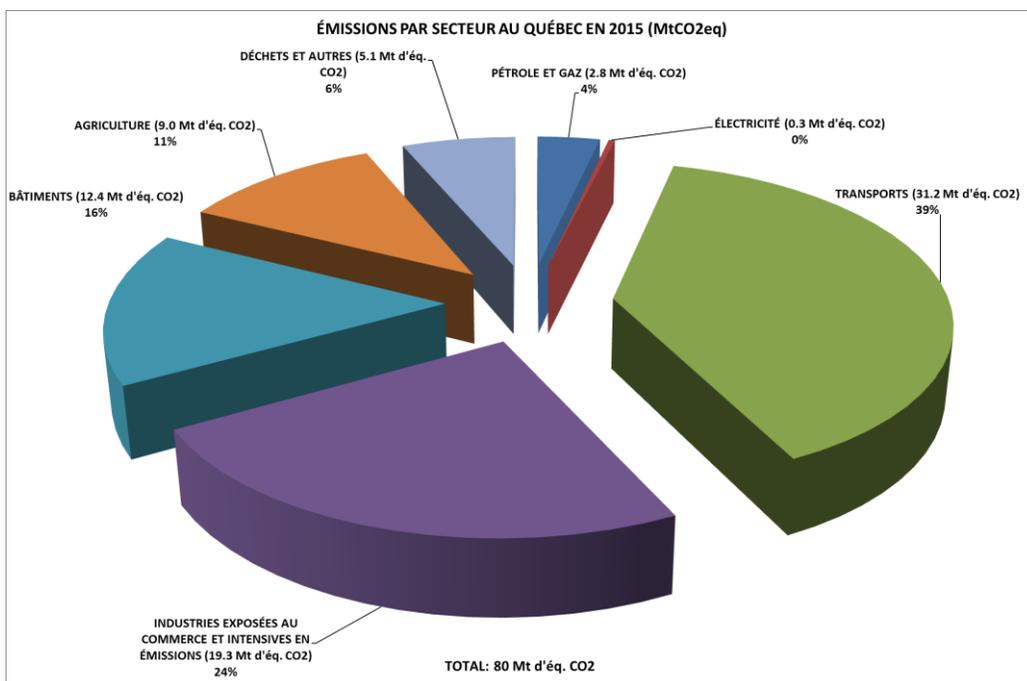


Figure 2. Émissions par secteur au Canada en 2015 [2]

1.1 Objectif global du projet

Ce projet vise à évaluer l'impact des constructions à haute efficacité énergétique ayant la particularité de compenser la totalité de l'énergie utilisée lors de la phase d'opération du bâtiment avec de l'énergie produite sur site. Les normes de constructions relatives aux bâtiments à haute efficacité énergétique incitent les promoteurs à utiliser généralement une grande quantité de matériaux au niveau de l'enveloppe, notamment beaucoup d'isolants, par rapport aux constructions conventionnelles². Pour ce faire, il paraît pertinent de faire une évaluation environnementale qui tient en compte la contribution aux impacts des matériaux additionnels utilisés dans la construction net-zéro comparativement aux impacts du bâtiment de type conventionnel consommant moins de matériaux.

1.2 Description de l'étude de cas et approche méthodologique

Dans le cadre du programme gouvernemental décrit ci-haut, FPIInnovations (FPI) a reçu, de la part du gouvernement du Québec, le mandat de faire une analyse du cycle de vie (ACV) des constructions à haute efficacité énergétique (bâtiment net-zéro) selon la norme ISO 14040/44 [6]. Étant donné que la bibliothèque de Varennes est le premier édifice institutionnel à consommation énergétique nette zéro au Québec, le choix s'est porté sur celui-ci. Le bâtiment fait l'objet d'une étude de cas dans le contexte particulier du Québec.

L'approche méthodologique consiste à faire de l'ACV selon la norme ISO 14040/14044, et à l'exécuter en quatre étapes réparties selon les quatre scénarios comparatifs illustrés sur la Figure 3. Le Tableau 1 souligne les principales différences notables entre le scénario de base et les scénarios alternatifs.

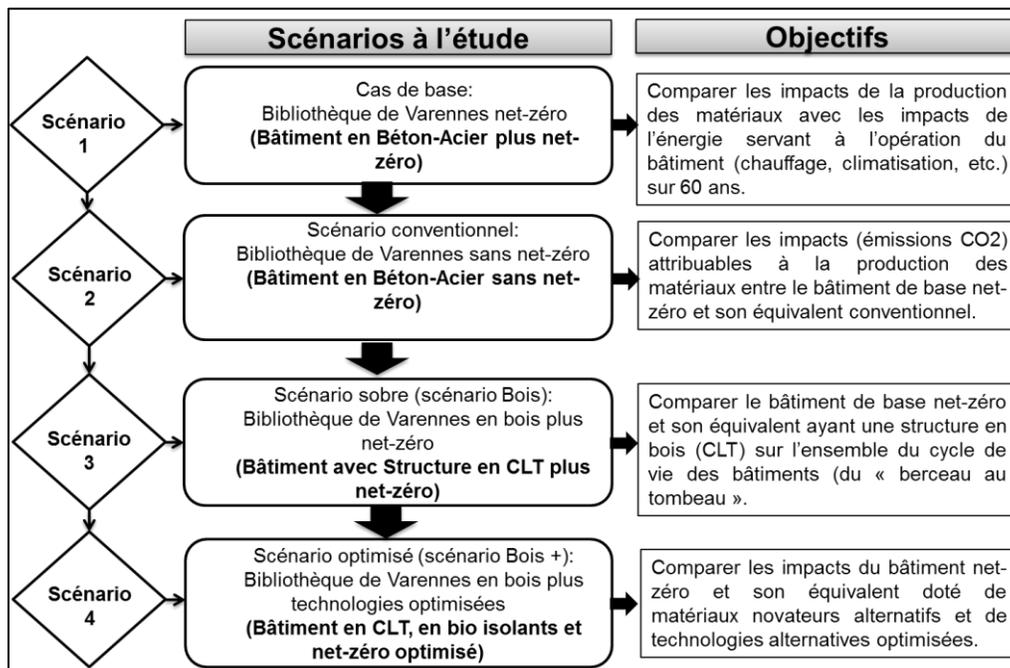


Figure 3. Scénarios comparatifs à l'étude

² Les bâtiments conventionnels font référence aux bâtiments respectant le code de construction et code de sécurité, ainsi que les exigences réglementaires en matière d'efficacité énergétique en vigueur et applicable au Québec, mais sans pour autant être équipés de nouvelles technologies en lien avec le concept de « net-zéro ».

Tableau 1. Synthèse des modifications et différences entre scénarios

Scénario	Description des principales modifications
Scénario 1	<p>Bâtiment actuel, tel que construit</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Poutres et poteaux en béton armé ▪ Dalle en béton armé ▪ Contreventements en acier ▪ Charpente en acier ▪ Toit de type cathédral <p>Systèmes actifs relatifs à net-zéro</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Système solaire ▪ Système géothermique plancher radiant ▪ Système de récupération de chaleur via roues thermiques
Scénario 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La forme, la structure, le toit et la fenestration demeurent identiques au bâtiment actuel ▪ Pas de système solaire ▪ Pas de système géothermique, et donc pas de plancher radiant ▪ Pas de système de roues thermiques ▪ Enveloppe respectant minimalement le code du bâtiment (ASHRARE 90.1?)
Scénario 3 (bois)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poutres et poteaux en bois (lamellé-collé & lamellé-croisé) ▪ Dalle en bois (lamellé-croisé) ▪ Platelage en bois ▪ Contreventements en acier ▪ Toit (poutres et colonnes en lamellé-collé) de même type cathédral ▪ Une même enveloppe que le scénario de base <p>Systèmes actifs relatifs à net-zéro</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Système solaire ▪ Système géothermique et plancher radiant ▪ Système de roues thermiques
Scénario 4 (bois +)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Poutres et poteaux en bois (lamellé-collé & lamellé-croisé) ▪ Dalle en bois (lamellé-croisé) ▪ Platelage de bois ▪ Plancher radiant ▪ Contreventements en acier ▪ Toit (poutres et colonnes en lamellé-collé) de même type (cathédral) ▪ Enveloppe incluant les matériaux en bois (ex. : isolant en panneaux de fibre de bois et revêtements en bois) <p>Systèmes actifs relatifs à net-zéro</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Système solaire (plus performant) ▪ Système géothermique (plus performant) et plancher radiant ▪ Système de roues thermiques (plus performant)

1.2.1 Scénario de base : Bibliothèque de Varennes

Le scénario de base est le bâtiment net-zéro de la bibliothèque de Varennes tel que construit. Le cas de base consiste à évaluer les impacts environnementaux et à analyser les contributions aux impacts des différentes étapes de cycle de vie du bâtiment actuel. L'étude est basée sur les données d'un bâtiment réel doté des

technologies opérationnelles depuis quelques années. Cette évaluation permettra précisément de mettre en exergue la part des émissions associées à la fabrication des matériaux et l'ordre de grandeur de celles-ci comparativement aux émissions émises ou évitées lors de la phase d'utilisation du bâtiment net-zéro.

1.2.2 Scénario conventionnel : bibliothèque sans technologies net-zéro

Le scénario alternatif est constitué d'un bâtiment de type conventionnel conçu exactement comme le bâtiment du cas de base, dans le respect des exigences normatives des codes (code du bâtiment et code de sécurité de Québec), mais sans pour autant être équipé de nouvelles technologies liées aux exigences normatives imposées par net-zéro. Ce scénario alternatif permettra de comparer les émissions totales de GES d'un bâtiment de type net-zéro avec celles d'un bâtiment de type conventionnel, fonctionnellement équivalent. Cette comparaison permettra de mettre en lumière la part des émissions associées aux matériaux additionnels (sur plus) utilisés dans le net-zéro et l'ordre de grandeur des émissions associées à l'étape d'utilisation du bâtiment conventionnel alimenté à l'hydroélectricité (pour des besoins énergétiques en chauffage et en climatisation).

1.2.3 Scénario bois : Bibliothèque de Varennes avec structure en bois

Le scénario bois est constitué d'un bâtiment semblable au bâtiment net-zéro du scénario de base, mais dont la structure et la charpente sont faites majoritairement en bois, plus précisément en lamellé-croisé (de l'anglais « *Cross Laminated Timber (CLT)* »). Une portion de la structure de ce scénario à savoir les contreventements est demeurée en acier. L'analyse de ce scénario permettra de mettre en exergue l'impact des émissions associé à l'usage des matériaux à faibles empreintes environnementales dans la structure du bâtiment. Les émissions évitées découlant de l'intégration des matériaux sobres en carbone dans le bâtiment net-zéro sont analysées et comparées à celles associées à l'atteinte de la cible de haute performance énergétique (cible net-zéro) lors de la phase d'utilisation du bâtiment.

1.2.4 Scénario bois⁺ : Bibliothèque de Varennes optimisée

Le scénario optimisé ou encore scénario bois⁺ est constitué d'un bâtiment de type bâtiment net-zéro, dont la structure et la charpente sont en bois, et dont l'enveloppe intègre plus de matériaux bois (ex : revêtements extérieurs en bois et isolants en panneau de fibre de bois) et dont les technologies net-zéro sont implantées de façon optimale et plus performantes que dans le cas de base. Le détail sur l'optimisation des systèmes actifs est présenté dans la section (voir section). Ce scénario permettra d'évaluer la performance environnementale d'un bâtiment net-zéro optimisé. Cette évaluation quant à elle permettra de mettre en exergue la réduction supplémentaire des émissions attribuables aux nouvelles technologies net-zéro plus performantes comparativement aux émissions associées au bâtiment du cas de base.

2. ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'inventorier les flux environnementaux (intrants et extrants) d'un système de produits donné tout au long de son cycle de vie, et qui évalue les impacts environnementaux potentiels qui y sont associés [7]. L'ACV est une approche encadrée par les normes ISO14040/44 (voir Figure 4). L'approche est subdivisée en quatre phases à savoir: 1) objectifs et champs d'études, 2) inventaire du cycle de vie (LCI), 3) évaluation de l'impact du cycle de vie (LCIA) et 4) interprétation [8] (voir annexe 1).

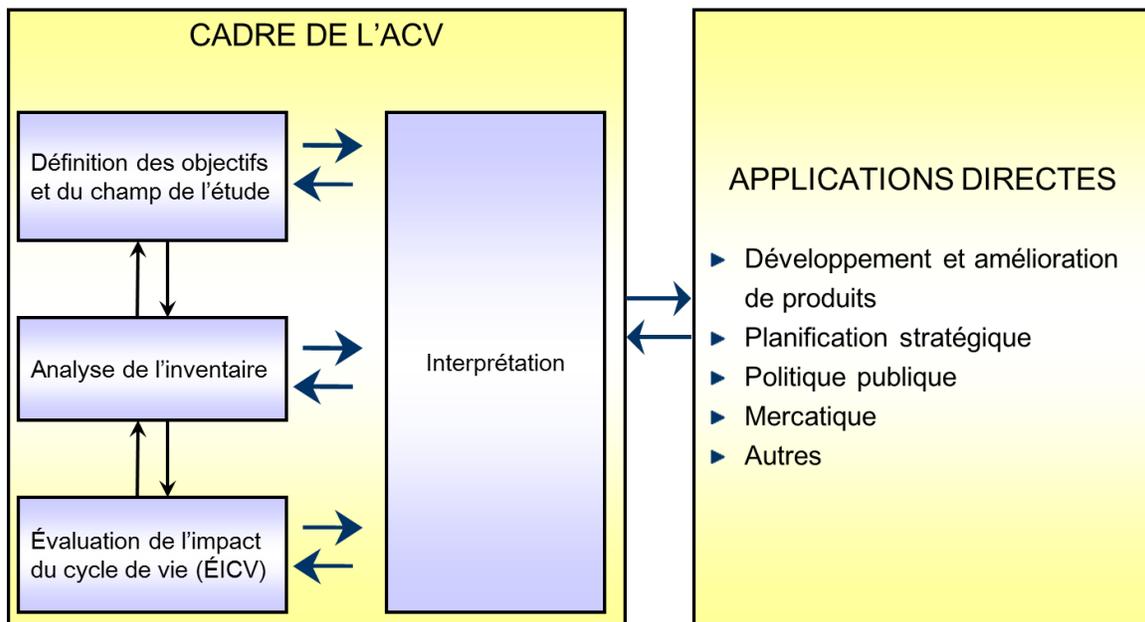


Figure 4. Phases de l'analyse de cycle de vie [8]

2.1 Objectifs et champ d'étude

2.1.1 Objectifs

Les objectifs de cette étude sont succinctement présentés dans la Figure 3. L'objectif premier de cette étude est de réaliser une analyse de cycle de vie comparative d'un bâtiment de type net-zéro (avec ses variantes) et un autre bâtiment équivalent de type conventionnel (sans l'inclusion des mesures actives/passives, technologies, normes et exigences relatives à net-zéro). Le but de cette comparaison est de mettre en relief la différence des performances environnementales des deux types de constructions, ainsi que d'identifier les principaux contributeurs qui influent sur les impacts environnementaux de chacun des types de bâtiments via l'énergie produite sur site par les technologies net-zéro. Le bâtiment de base à l'étude est la bibliothèque de Varennes dans son état actuel. Étant donné que cette étude s'inscrit dans le cadre du programme de développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone, le second objectif est de comparer les performances environnementales du bâtiment actuel, conçu majoritairement en béton et en acier (au niveau structural) avec ses équivalents (scénario 3 et scénarios 4) conçus en bois et autres matériaux sobres en carbone. Le troisième objectif est de mettre en exergue les émissions intrinsèques « *embodied emissions* » associées à l'usage des matériaux additionnels dans des bâtiments net-zéro (scénarios 1, scénario 3 et scénario 4) comparativement aux émissions associées à l'étape d'opération par l'usage des énergies solaires et géothermiques au lieu de l'électricité conventionnelle. Le quatrième objectif est d'analyser le rapport des bénéfices environnementaux potentiels, c'est-à-dire étudier si l'utilisation des matériaux sobres en carbone, notamment comme matériaux structuraux (bois lamellé-croisé) et matériaux isolants, ne représente pas une opportunité de réduction d'émissions beaucoup plus importante que la réduction d'émissions attribuable à l'atteinte, en soi, des cibles de haute performance énergétique visées dans net-zéro.

2.1.2 Hypothèses

Quatre hypothèses ont été posées. La première hypothèse stipule que les bâtiments de type net-zéro consomment une quantité plus élevée de matériaux lors de la construction (dans le but de respecter les exigences du code net-zéro) conduisant à une empreinte environnementale plus élevée que celle de son équivalent conventionnel. La deuxième hypothèse est que l'usage des matériaux à faible empreinte carbone, en remplacement des matériaux conventionnels au niveau de la structure et de l'enveloppe du bâtiment, peut réduire l'empreinte environnementale des bâtiments net-zéro. Les deux autres hypothèses sont reliées à l'énergie consommée par un bâtiment conventionnel et institutionnel au Québec. Ainsi, la troisième hypothèse suppose un approvisionnement énergétique composé de 100 % d'hydroélectricité, alors que la quatrième suppose un approvisionnement combiné de deux sources d'énergie différentes, à savoir le gaz naturel et l'hydroélectricité. Les deux cas de figure du bâtiment conventionnel, auxquels sont associées ces deux dernières hypothèses, seront analysés sous forme d'analyse de sensibilité.

2.1.3 Raisons de l'étude

La première raison de cette étude est reliée aux considérations énergétiques et environnementales issues de l'intégration des énergies renouvelables au sein des bâtiments résidentiels et institutionnels. L'émergence de ces technologies produisant de l'énergie renouvelable suscite beaucoup d'attention et d'intérêt chez les professionnels du domaine de la construction. La performance et l'efficacité de celles-ci méritent d'être évaluées et analysées dans le contexte particulier du bouquet (mix) énergétique québécois composé essentiellement d'hydroélectricité. La deuxième raison est liée à la considération du programme de développement des connaissances sur les matériaux sobres en carbone. Il est pertinent de comparer les performances environnementales des bâtiments à haute efficacité énergétique en bois à celles des bâtiments en béton et acier étant donné que ces matériaux structuraux (béton et acier) sont largement utilisés dans les bâtiments de moyenne et de grande et que des produits de remplacement en bois (CLT et lamellé-collé) sont disponibles depuis peu.

2.1.4 Importance et pertinence

FPIinnovations (FPI) est un organisme de recherche qui s'est toujours donné la mission de favoriser la croissance et la prospérité du secteur forestier. Aussi, le programme de développement des connaissances sur les matériaux sobres en carbone dans le domaine de la construction cadre bien avec le créneau de recherche de FPI. Dans ce domaine, FPI a supporté plusieurs projets de construction ayant intégré des matériaux sobres en carbone tels que le CLT et le Glulam (ex. le bâtiment Brock Commons à Vancouver, le bâtiment Origine à Québec). Or, l'évaluation conceptuelle et environnementale d'un premier édifice institutionnel net-zéro en matériaux à faible empreinte carbone dans le contexte particulier du Québec constitue un cas d'étude unique. En effet, ce cas d'étude permet d'intégrer non seulement les aspects relatifs aux exigences normatives et technologiques du net-zéro, mais permet aussi d'explorer les potentiels bénéfiques environnementaux pouvant découler de la combinaison du potentiel net-zéro des bâtiments et du caractère sobre en carbone des matériaux.

2.1.5 Audience visée

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). Ces ministères détermineront, le cas échéant, si le rapport fera l'objet d'une large diffusion. L'auditoire visé est considéré comme non technique.

Aucun comité externe formé par les parties intéressées ne révisera cette étude. Une revue critique avec panel ne sera pas réalisée, mais un expert a quand même été mandaté pour évaluer la qualité et la conformité du rapport aux normes ISO 14040 et 14044.

2.1.6 Applications prévues et portée de l'étude

Les résultats de cette étude serviront à donner un aperçu du profil global des émissions de GES des systèmes complexes tels que ceux composés de bâtiment en CLT, en matériaux sobres en carbone et en technologie de type net-zéro. L'étude peut également servir comme base de référence (benchmark) pour l'évaluation des impacts environnementaux des projets de bâtiments modernes dotés de nouvelles technologies et de matériaux innovants et sobres en carbone. Le contexte énergétique du Québec étant particulier (composé essentiellement de l'hydroélectricité), les résultats de cette étude pourront aider les professionnels du domaine à faire des choix éclairés et avisés qui auront certainement une portée bien plus large et bien au-delà de la Ville de Varennes. En d'autres mots, cette étude permettra : 1) d'effectuer le transfert des connaissances aux acteurs et professionnels de la construction; 2) de diffuser la connaissance au sujet des bâtiments net-zéro auprès du grand public et auprès des décideurs politiques; 3) de fournir des données, des informations et des connaissances sur les matériaux sobres à faible empreinte carbone; et 4) de proposer des solutions permettant aux municipalités de contribuer à l'atteinte des cibles de réduction de GES visées par le gouvernement de Québec.

2.2 Champ de l'étude

2.2.1 Description du système à l'étude : bibliothèque de Varennes

La ville de Varennes souhaitait offrir à ses habitants un nouveau cadre de vie moderne, accueillant et favorisant l'accès à l'information, à l'éducation et à la culture. Pour ce faire, la Ville a opté pour une approche de conception intégrée qui a permis à de nombreux experts, professionnels, chercheurs et membres de la communauté d'apporter leur contribution à la construction de la nouvelle bibliothèque municipale.

Dans ce contexte, la firme d'ingénierie Stantec a été mandatée en 2011 pour réaliser la conception électromécanique des systèmes ainsi que l'ingénierie structurale du bâtiment. C'était un objectif ambitieux : concevoir un bâtiment à consommation énergétique nette nulle. Bien que plusieurs solutions aient été envisagées, les solutions retenues se limitaient à celles offrant une performance énergétique optimale dans les paramètres de coût de construction, ainsi qu'à la fiabilité du système et à la facilité de la maintenance.

La bibliothèque est construite sur deux étages et couvre une superficie totale de 2 230 mètres carrés (voir Figure 5) [9]. Elle offre un environnement propice à l'apprentissage et à la découverte, avec une abondance d'espaces baignés de lumière naturelle. Ouverte au public depuis décembre 2014, la bibliothèque comprend une salle d'activités, des espaces de travail, une salle de lecture, un espace réservé aux parents et à l'allaitement, un laboratoire informatique doté des technologies les plus modernes, ainsi que des stations d'écoute et de visionnement.

2.2.2 Bâtiment net-zéro : conception et aspects techniques

La Figure 5 est l'illustration de la nouvelle bibliothèque, laquelle est construite sur le site de l'ancienne bibliothèque. La bibliothèque net-zéro de Varennes est le fruit d'une conception innovante. En vue d'atteindre les caractéristiques d'un bâtiment à haute efficacité énergétique, les experts impliqués dans la conception ont

eu recours à des mesures passives et actives. Les mesures passives consistent à accroître les qualités intrinsèques d'un bâtiment afin d'optimiser l'utilisation des énergies qui lui sont fournies. Il s'agit par exemple de repenser l'orientation du bâtiment, de repenser la forme et la nature de l'enveloppe du bâtiment, de limiter les pertes d'énergies aux endroits stratégiques en soignant l'isolation au niveau des toitures, des façades et des ouvertures (portes, fenêtres, puits de lumière). Les mesures actives quant à elles, consistent à recourir aux solutions technologiques pouvant agir et contrôler directement le rendement et la production énergétique (ex. : outils de gestion de l'éclairage par capteur, thermostats intelligents, systèmes solaires et géothermiques, etc.).

Le couplage des solutions passives et actives permet, grâce à la forme allongée et à la profondeur réduite du bâtiment, de garantir une pénétration optimale de la lumière et une ventilation croisée. De même, le bâtiment a été réorienté de manière à maximiser une exposition sud pour les surfaces de mur et de toit. Incliné à 37 °, le toit expose 428 panneaux photovoltaïques solaires du côté sud. Ces panneaux solaires ont un rendement d'environ 15 %, ce qui signifie que 85 % de l'énergie solaire est dissipée sous forme d'énergie thermique (chaleur). Cette chaleur confinée dans l'espace comprise entre l'arrière des panneaux solaires et la toiture est récupérée par la roue thermique. En effet, l'usage de la roue thermique permet de canaliser cette énergie et de réduire les besoins énergétiques en chauffage.

La mise en place d'un système avec des pompes à chaleur géothermiques combinées à huit puits géothermiques de 152 mètres de profondeur alimentant les planchers radiants. Les ventilo-convecteurs, opérant à vitesse variable, permettent à la fois de calibrer la puissance optimale le fonctionnement des pompes à chaleur et d'assurer un confort dans les pièces.

L'éclairage étant une source importante de consommation d'énergie, la fenestration du bâtiment a été conçue pour tirer pleinement profit de la lumière naturelle. La bibliothèque est équipée de fenêtres offrant une performance énergétique supérieure (certification minimale d'infiltration d'air) et une isolation de haute efficacité. Chaque zone est dotée d'un capteur de présence qui maintient les lumières allumées uniquement lorsque les locaux sont occupés.

En outre, une station météorologique est installée sur le toit pour fournir des données de niveau d'éclairage extérieur à un système de contrôle centralisé (interface d'éclairage adressable numériquement par IP), de sorte que les niveaux d'éclairage des appareils sont ajustés en fonction des informations reçues. Un système de contrôle enregistre et affiche les informations sur la consommation d'énergie sur un écran situé près de l'entrée de la bibliothèque, ce qui permet de surveiller facilement l'évolution de la consommation et de la production d'énergie. Grâce à ces systèmes à haute efficacité, le bâtiment actuel ne consomme que l'équivalent de 20 % d'énergie que consommerait un bâtiment conventionnel équivalent de taille comparable, respectant le code de construction et code de sécurité, ainsi que les exigences réglementaires en matière d'efficacité énergétique en vigueur et applicable au Québec [10].

Le Tableau 2 présente un sommaire des données de conception qui ont été prises en compte pour mettre en place des mesures passives et actives capables de répondre aux besoins énergétiques du bâtiment lors de son étape d'utilisation.

Tableau 2. Critères de conception [9, 11, 12]

Informations et données techniques

- La production d'électricité est assurée par 428 panneaux PV intégrés au toit en pente du bâtiment, couvrant 710 mètres carrés (95 % de la surface du versant sud de la toiture). Ces panneaux de 260 watts chacun ont une efficacité de 15 %.
- Le nombre de panneaux, l'inclinaison du toit et l'exposition ont été conçus pour répondre adéquatement aux besoins annuels en électricité de la bibliothèque, soit 120 000 kWh/an.
- Orientation du bâtiment et positionnement de la fenestration (50,7 % au sud, 19,5 % à l'ouest) optimisant l'apport énergétique passif;
- Limitation des gains thermiques en été au moyen de différents dispositifs (ex. : brise soleil);
- Toiture en pente avec une inclinaison de 37°, exposée au sud, pour optimiser l'exposition des panneaux photovoltaïques aux rayons solaires;
- Profondeur réduite du bâtiment (18,3 m) pour favoriser l'apport d'éclairage naturel (plus de 90 % des espaces) et la ventilation naturelle via l'air extérieur;
- Finis intérieurs clairs pour accentuer la luminosité naturelle à l'intérieur du bâtiment;
- Puits de lumière (surface totale de 29,2 m²);
- Mur vitré en bois permettant de profiter des gains solaires tout en affichant une performance thermique minimale de R8;
- Isolation supérieure de l'enveloppe de bâtiment (murs : R38; toiture : R45);
- Masse thermique dans les dalles de plancher – système de plancher chauffant;
- Dalles radiantes comportant un réseau de tuyauterie circulant un mélange d'eau distillée et de propylène glycol (25 %) à 37,2 °C à l'alimentation et à 26,7 °C au retour (recirculation après transfert de chaleur);
- Système géothermique comportant 8 puits à 150 mètres (capacité du système de 281 400 Btu/h en chauffage et de 318 800 Btu/h en climatisation);
- Deux thermopompes eau-eau de 5 tonnes et deux de 10 tonnes;
- Récupération de la chaleur de l'air vicié évacué au moyen d'une roue thermique (efficacité de l'ordre de 75 %);
- Éclairage artificiel au moyen de luminaires de type T-8;
- Préchauffage de l'air neuf au moyen de panneaux solaires thermiques;
- Ventilation mécanique et naturelle des panneaux pour optimiser la performance de ceux-ci;
- Ventilateurs-convecteurs (au nombre de 20) avec entraînement à vitesse variable;
- Ouvrants motorisés (ouverture programmée et automatisée des fenêtres – une vingtaine) sur les façades nord et sud;
- Système de contrôle du bâtiment avec détecteur de présence et sondes de CO₂ permettant de moduler la consommation énergétique (lumières) en fonction des besoins des usagers et de contrôler la concentration en ppm du CO₂;



Figure 5 : Illustration de la maquette du bâtiment en vue aérienne

2.2.3 Bâtiment net-zéro optimisé

Le bâtiment net-zéro optimisé est un bâtiment hypothétique dans lequel, les performances des éléments actifs du net-zéro ci-haut, sont améliorés par des actions précises. L'optimisation explore les gains potentiels ou économie potentielle pouvant découler des modifications faites au niveau l'éclairage, de la géothermie, de la roue thermique, de la ventilation et la photovoltaïque.

- Éclairage : le remplacement de l'éclairage actuel majoritairement fluorescent avec un éclairage 100 % DEL réduirait de 50 % la consommation en éclairage.
- Thermopompes : le remplacement des thermopompes géothermiques actuelles de type COP : 4 – EER : 20.3 avec des thermopompes de type COP : 5 – EER : 25.7 augmenterait de 25 % la performance opérationnelle actuelle des thermopompes.
- Roue thermique : le remplacement de la roue thermique actuelle à 50 % d'efficacité par un récupérateur à cassettes de 80 % d'efficacité augmenterait de 60 % la performance opérationnelle du système.
- Ventilation : la modulation ciblée des ventilo-convecteur selon les horaires d'ouverture de l'établissement assurerait une économie de 5 % comparativement à la modulation actuelle.
- Photovoltaïque : le remplacement des panneaux solaire actuel (260W/unité) ayant une efficacité de 15 % avec des panneaux plus performants (365W/unité) ayant une efficacité de 21.1 % augmenterait de 40 % la performance du système actuel.

La modélisation a été réalisée par la firme Martin Roy et Associés (MRA). Tous les détails sur les paramètres de modélisation, le calibrage et les hypothèses sont présentés dans l'Annexe 3.

2.2.4 Fonction et unité fonctionnelle

La fonction est l'élément essentiel dans une étude ACV comparative. Ainsi, pour qu'une comparaison soit possible entre deux systèmes quelconques, il faut que les systèmes aient au moins une fonction principale commune, même si les fonctions secondaires de l'un peuvent être différentes de celles de l'autre [13]. Dans le cadre de cette étude, la fonction principale associée aux scénarios de bâtiment en comparaison est celle de recevoir une collection de livres ou documents qui peuvent être empruntés ou consultés sur place par le grand public. La fonction d'une bibliothèque est aussi d'offrir un espace d'accueil et de rencontre, un environnement éducatif et culturel qui offre des ressources variées aux citoyens, lesquelles contribuent à l'apprentissage, à l'enseignement et à l'acquisition de connaissances [14, 15]. Les fonctions supplémentaires de la bibliothèque incluent la fourniture d'espaces publics pour se garer, pour se protéger des intempéries, pour se réchauffer, pour se rafraîchir, pour se divertir, pour lire et étudier. Les quatre scénarios de bâtiments comparés dans cette étude offrent un approvisionnement adéquat et identique pour toutes les fonctions qu'elles soient principales ou secondaires. Cela étant dit, l'on peut observer que tous les scénarios remplissent parfaitement les mêmes fonctions. De fait, les scénarios sont dits fonctionnellement équivalents, rendant ainsi possible la comparaison selon les normes ISO 14040/44.

En ACV, une unité fonctionnelle sert à établir une base de comparaison appropriée entre des systèmes jugés fonctionnellement équivalents. Le bâtiment de base à l'étude a été conçu pour mettre à la disposition du public, un espace ayant une superficie plancher de 2 230 m², comprenant un rez-de-chaussée (RDC), un étage supérieur, des cloisons, des couloirs, des étagères de rangement pour livres, les locaux servant de bureaux pour le personnel et des salles de travail multi-usagers. Le bâtiment de base est localisé dans la ville de Varennes. L'unité fonctionnelle de base est donc un espace surface plancher de 2 230 m² remplissant adéquatement la fonction principale d'une bibliothèque pendant 60 ans.

2.2.5 Frontières du système à l'étude

Les limites du système sont présentées à la Figure 6. Le système présente toutes les étapes ou phases de cycle de vie du bâtiment, de l'étape de production des matériaux jusqu'à l'étape de fin de vie. Dans le domaine du bâtiment, chaque principale étape du cycle de vie est subdivisée en modules d'informations de types A, B, C, et D, selon la norme EN 15978 [16]. Ainsi, l'étape de production des matériaux comprend trois modules d'informations A1, A2, et A3, lesquelles réfèrent respectivement à l'extraction, le transport et la transformation des matières premières. L'étape de construction du bâtiment comprend deux modules d'informations A4 et A5. Le module A4 réfère au transport des matériaux du site de production vers le site de construction, tandis que le module A5 réfère aux activités de construction proprement dites sur le site. L'étape d'utilisation du bâtiment comprend sept modules d'informations allant de B1 à B7, lesquelles réfèrent respectivement à l'utilisation, la maintenance, la réparation, le remplacement, la remise à neuf, l'utilisation de l'énergie, et l'utilisation de l'eau. L'étape de fin de vie du bâtiment comprend quant à elle quatre modules d'informations allant de C1 à C4, lesquelles réfèrent respectivement à la démolition, le transport des déchets, le traitement des déchets et l'élimination des déchets par incinération ou par enfouissement.

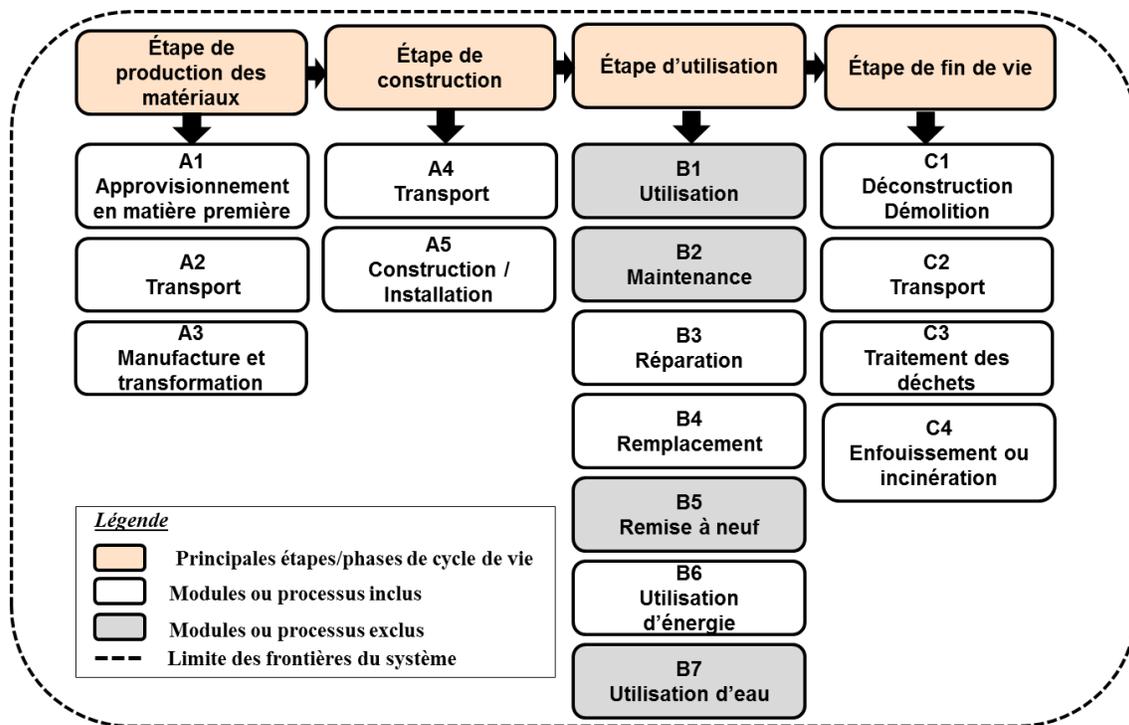


Figure 6. Frontières du système

La légende de la Figure 6 illustre les modules ou processus inclus et exclus du système à l'étude. En effet, en raison des contraintes imposées par la durée de cette étude, certaines activités relatives à l'étape l'utilisation, représentée ici par des modules colorés en gris, ont été supposées similaires entre les scénarios comparés. Une autre raison de l'exclusion est liée à la rareté ou encore la difficulté de recueillir certaines données relatives à la durée de vie spécifique de certains matériaux sobres en carbone (CLT, isolant bois, etc.), étant donnée la récente intégration de ces types de matériaux dans le domaine de la construction. Aussi, en vue de s'assurer de la pertinence des bâtiments à remplir adéquatement les fonctions de confort et d'esthétisme intérieurs, un effort est censé être mis en œuvre par les services d'ingénierie et d'architecture afin d'assurer la quasi-similarité des finitions et décorations intérieurs (ex. : certaines cloisons intérieures et ameublements (mobiles et fixes), la quincaillerie (latrines, peinture, moulures décoratives et luminaires), et autres).

Par contre, en raison du manque d'information, les services offerts par les ingénieurs et les architectes, le transport des travailleurs et professionnels, le transport de la machinerie lourde et légère vers le site de construction (ex. grues, et 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 également été exclus des limites du système. De plus, il a été supposé que tous ces processus sont relativement similaires d'un scénario à l'autre.

Il a aussi été supposé que les fondations actuelles du bâtiment sont assez solides pour supporter autant une structure en béton-acier qu'une structure en bois.

Les matériaux constitutifs des éléments actifs tels que le système solaire, le système de roues thermiques et le système géothermique ne sont pas comptabilisés dans l'étape de production des matériaux du bâtiment. En effet, ces éléments actifs font partie d'un autre système d'inventaire servant à produire de l'énergie qui alimente le bâtiment. Les impacts associés à la production de ces matériaux (ex : panneaux solaires, onduleurs,

ventilo-convecteurs, etc.) sont déjà pris en compte par le système énergétique du bâtiment. De plus amples explications à ce sujet sont pourvues à la section 2.3.6 (inventaire des éléments actifs). Le tableau ci-dessous (Tableau 3) présente un sommaire d'éléments du bâtiment exclus de l'étude.

Les déchets de démolition en fin de vie seront traités selon les données produites par de Recyc-Québec[17]. Autrement dit, une allocation sera appliquée pour séparer les déchets recyclés et revalorisés du reste des déchets acheminés vers le site d'enfouissement. Les déchets recyclés et revalorisés sont exclus des frontières du système à l'étude.

Tableau 3. Éléments du bâtiment exclus des frontières du système à l'étude

Liste des éléments exclus
Escaliers
Cloisons intérieures (murs intérieurs)
Plomberie et filage électrique
Mobilier & quincaillerie
Finitions (peinture, moulures, revêtement plancher, etc.)

2.2.6 Critères de délimitation de l'étude

Les critères de délimitation du système (de l'anglais «*cut-off*») sont essentiels en ACV, car ils permettent d'appliquer certaines règles de cohérence dans la définition des limites du système à l'étude. Il y a trois règles fondamentales pour définir les limites de l'étude [13]. La première règle stipule que les limites du système doivent couvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios. Cette règle permet de vérifier si les scénarios à l'étude remplissent parfaitement la même fonction à l'intérieur des frontières du système défini. Dans la sous-section 2.2.4, il a été démontré que les différents scénarios de bâtiments proposés offraient un approvisionnement adéquat et identique des fonctions principales et secondaires.

La seconde règle stipule que les processus contribuant à plus d'un certain pourcentage de la masse des intrants, de la consommation énergétique ou des émissions d'un polluant sont retenus. Le seuil de rétention des processus étant préalablement fixé. Cette règle détermine lors d'une évaluation préliminaire des impacts, un ordre de grandeur et de la contribution de différents processus, afin d'en éliminer ceux ne respectant pas le seuil fixé. Cependant, il n'est pas toujours évident de fixer la valeur seuil de façon claire, car elle dépend du système étudié. Dans le cadre de cette étude, le critère seuil d'exclusion, généralement fixé autour de 1 % à 3 % sur une base massique des intrants du système[13], ne sera pas appliqué. En effet, le bâtiment présente une grande variabilité au niveau des contributions massiques des matériaux enjeux. Par exemple, le poids total de certains matériaux très légers (ex. : les membranes et les isolants) est généralement négligeable comparativement au poids total de l'acier, du béton ou du bois. Néanmoins, la contribution aux impacts de ces matériaux légers est non négligeable.

La troisième règle stipule que les étapes de cycle de vie, ainsi que les processus jugés identiques dans les différents scénarios, peuvent être exclues dans la mesure où les flux de référence affectés par ces étapes sont considérés équivalents. Cette règle est celle qui a été appliquée à la sous-section 2.2.5. En effet, elle a permis d'exclure les sous-étapes ou modules B1, B2 et B5 dans l'étape d'utilisation. L'extension de la même règle aux composants du bâtiment a permis d'exclure certains éléments illustrés au Tableau 3.

2.2.7 Sources de données

Cette étude a eu recours à plusieurs sources ou base de données. Il existe deux sources de données utilisées en ACV : les données primaires et les données secondaires.

Les données primaires sont les données spécifiques utilisées pour décrire et modéliser l'avant-plan. Dans le cadre de cette étude, l'avant-plan fait référence aux étapes de construction, d'utilisation et de fin de vie. Ces données sont obtenues par l'analyse des bilans de matières, les bilans d'énergies, la lecture des plans, les échanges et communications avec les ingénieurs et architectes. Toutefois, lorsque la quête des données primaires n'est pas concluante, les données secondaires sont utilisées.

Les données secondaires quant à elles, sont généralement celles utilisées pour décrire et modéliser l'arrière-plan. Dans cette étude, l'arrière-plan (de l'anglais « *upstream* ») fait référence à l'étape de production et de fabrication des matériaux. Les données secondaires sont des données génériques, disponibles et accessibles à travers différentes bases de données spécialisées développées par des experts. Les principales sources de données secondaires utilisées dans cette étude sont principalement la base de données Ecoinvent v3.3 et la base de données US LCI [18-21].

2.2.8 Qualité des données

La qualité des données est intrinsèquement liée à la qualité des bases de données utilisées pour modéliser l'avant-plan et l'arrière-plan. La qualité des données collectées est présentée dans la section approche de collecte de données (section 2.3.1) et la section analyse de la qualité des données (section 2.3.7).

2.2.9 Méthode d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts

Cette section présente sommairement la méthode d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) utilisée pour l'évaluation d'impacts des scénarios analysés et l'analyse de contribution des processus pour identifier les étapes dominantes du cycle de vie du bâtiment.

2.2.9.1 TRACI

L'outil utilisé pour cette évaluation est TRACI (de l'anglais : *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*), développé par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA). TRACI permet de caractériser les flux d'inventaire en utilisant des facteurs de caractérisation spécifiques à l'Amérique du Nord [22]. La version V2.1 de TRACI a été utilisée pour caractériser les flux d'inventaires. Les catégories d'impact ci-dessous ont été choisies pour décrire l'ensemble des impacts sur l'environnement et sur le cycle de vie du système étudié (Tableau 4). Afin d'assurer la robustesse des conclusions, une autre méthode d'ÉICV (IMPACT 2002+) a été utilisée en parallèle.

Tableau 4. Indicateurs environnementaux considérés

Catégorie d'impacts	Unité
Réchauffement climatique	kg CO ₂ eq
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq
Formation de smog photochimique	kg O ₃ eq
Acidification	kg SO ₂ eq
Eutrophisation	kg N eq
Effets respiratoires	kg PM 2.5 eq
Écotoxicité	CTUe
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus

2.2.9.2 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 gaz à effet de serre (GES), telles que le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes nitreux, etc. Les gaz à effet de serre captent la chaleur qui autrement s'échapperait de la Terre. Le réchauffement climatique est exprimé en kg d'équivalent CO₂.

2.2.9.3 Appauvrissement de la couche d'ozone

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, telle 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.

2.2.9.4 Formation de smog photochimique

Dans certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques (oxydes d'azote (NOx) 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.

2.2.9.5 Acidification

L'acidification est 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 contribuent 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, des sources synthétiques, principalement des émissions de dioxyde de soufre (SO₂) et d'oxydes d'azote (NOx) 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.

2.2.9.6 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 entraîner 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).

2.2.9.7 Écotoxicité

L'exposition de la faune et de la flore à des substances chimiques libérées au cours du cycle de vie des matériaux utilisés dans le bâtiment peut avoir des effets néfastes. Les facteurs de caractérisation intègrent le devenir des substances chimiques dans l'environnement, ainsi que leurs effets sur les organismes, quels que soient le lieu et le moment où ces substances sont rejetées.

2.2.9.8 Effets respiratoires

Les émissions de particules primaires (PM) et de particules secondaires (provenant des émissions de SO₂ et de NO_x qui créent des aérosols de sulfate et de nitrate) peuvent créer des problèmes respiratoires chez l'homme. Chaque facteur de caractérisation intègre le devenir dans l'environnement, l'exposition et la relation dose-réponse tirés d'études épidémiologiques du polluant.

2.2.9.9 Épuisement des ressources fossiles

L'utilisation des énergies non renouvelables et de minerais limite leur disponibilité pour les générations futures. Pour les énergies non renouvelables, telles que les combustibles fossiles, l'épuisement correspond au pouvoir calorifique de l'énergie primaire extraite du sol. Pour l'extraction minière, l'épuisement est mesuré comme le surplus d'énergie nécessaire pour extraire une ressource de concentration ou de valeur inférieure et la concentrer au niveau du minerai actuellement extrait du sol.

2.2.10 Logiciel utilisé pour la modélisation et calculs

Le logiciel d'ACV SimaPro 9.0.0.30 de PRé-Consultants est utilisé pour modéliser l'ÉICV et pour calculer les impacts environnementaux potentiels des systèmes à l'étude[23].

2.2.11 Interprétations des résultats

L'interprétation des résultats est une phase qui comprend aussi bien l'identification des points chauds (dans chaque étape de cycle de vie) et la mise en exergue des contributions aux impacts de chaque matériau clé (identification des principaux contributeurs aux impacts globaux), que la vérification des hypothèses et des données d'inventaire. Il s'agit par exemple d'évaluer la sensibilité des résultats aux hypothèses et aux 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. En d'autres mots, la phase d'interprétation permet d'analyser les résultats, et d'en tirer des conclusions justifiées, d'expliquer les limites de l'étude, de formuler les recommandations claires et utilisables par les décideurs dans leur processus de la prise de décisions (Jolliet, 2017).

2.2.12 Considération des limites de l'étude

De par sa complexité, l'analyse de cycle de vie (ACV) présente des limites pratiques (manques de données, accès limité à certaines informations confidentielles associées à certains brevets ou autres propriétés intellectuelles) et des limites conceptuelles (niveau de détails et le temps à y consacrer). De plus, la fiabilité des résultats de l'ACV peut être influencée par le choix des hypothèses et le choix des données. D'où la nécessité pour les analystes de s'assurer d'appliquer rigoureusement les règles de bonne pratique en se conformant aux normes ISO 14040/44. Nonobstant ces limites pratiques et conceptuelles inhérentes à l'ACV, cette étude est réalisée dans un effort de conformité aux normes ISO 14040/44[6]. Les limites de cette étude seront déterminées et présentées dans la section appropriée.

2.2.13 Revue critique

Cette étude n'est pas destinée à être divulguée au public. Toutefois, il serait possible qu'elle le soit, compte tenu de l'importance de l'étude (développement des connaissances) et de la nature comparative de celle-ci. Pour ce faire, un reviseur externe, M. François Charron-Doucet, Ing. M. Sc. A, Directeur scientifique – Responsabilité entreprise chez Groupe AGECO a reçu le mandat d'examiner le rapport, afin de garantir la qualité de celui-ci et sa conformité aux normes ISO 14040/14044 [6].

2.3 Inventaires et modélisation dans SimaPro

Cette section présente les inventaires des matériaux constitutifs des scénarios de bâtiments et les modèles utilisés pour modéliser les impacts dans SimaPro. Les inventaires permettent de faire le bilan des matières et le bilan d'énergie des flux entrants (intrants) et sortants (extrants) de chaque système délimité par les frontières bien définies.

Cette section est subdivisée en sept (7) sous-sections dont la première présente l'approche générale adoptée pour collecter les données. Les quatre sous-sections subséquentes représentent chacune, une étape de cycle de vie du bâtiment selon la norme EN 15978 [16] (Figure 6), à savoir : 1) l'étape de production des matériaux; 2) l'étape de construction; 3) l'étape d'opération; et finalement 4) l'étape de fin de vie. L'avant-dernière sous-section³ présente sommairement les modèles utilisés pour modéliser chaque étape du cycle de vie du bâtiment. La dernière sous-section présente les inventaires associés aux éléments actifs tels que les éléments chauffants du plancher radiant, le système photovoltaïque, système géothermique et finalement le système de ventilation par roues thermiques

2.3.1 Approche de collecte de données

2.3.1.1 Collecte de données

La collecte de données est la composante la plus complexe et la plus longue qui nécessite d'importantes ressources en ACV. Cette étude a eu recours à deux principales sources de données. La première est la base de données Ecoinvent, qui fournit une pléthore de flux couvrant un éventail de processus manufacturiers et de services. La seconde source de données est constituée de données collectées sur le terrain à travers des visites, ateliers et livrables fournis par les collaborateurs du projet et experts dans leurs domaines respectifs.

2.3.1.2 Base de données Ecoinvent

Les données de la base de données Ecoinvent ont été utilisées comme données secondaires. La base de données Ecoinvent s'est bâtie une réputation internationale en tant que base de données fiable en termes de : 1) complétude ; 2) équivalence ; 3) disponibilité ; et 4) d'adaptabilité géographique.

1. Complétude : Ecoinvent est dite complète parce qu'elle contient des informations sur presque tous les processus unitaires impliqués dans le bois, le béton, l'acier et les flux indirects tels que le transport, la production d'énergie et les produits chimiques. En d'autres termes, toutes les données pertinentes liées à la portée de l'étude actuelle sont incluses dans la base de données.
2. Équivalence : Ecoinvent permet d'identifier les processus équivalents. Elle permet aussi d'établir une base de référence fiable qui évite de s'appuyer sur des sources de données séparées et non corrélées

³ Cette sous-section sera transférée en annexe (Annexe-2) après révision et validation par le réviseur.

aux différents processus unitaires. L'équivalence des données élimine les divergences potentielles et réduit les écarts-types et incertitudes liées aux données.

3. Disponibilité : Ecoinvent est une source de données fiable et accessible. Elle permet de combler les lacunes dues au manque de données associées aux problèmes récurrents de transparence, de confidentialité et de propriété intellectuelle, en offrant des données pondérées ou moyennées provenant des technologies ou industries très compétitives.
4. Adaptabilité : Ecoinvent permet de transposer géographiquement les données. En effet, elle offre la possibilité aux utilisateurs d'adapter les processus unitaires en fonction des spécificités continentales, régionales ou locales (ex. : moyens de transport, distances, mix énergétiques et rendement des systèmes).

2.3.1.3 Collaboration et ateliers de recherche

La fiabilité des résultats d'une analyse de cycle de vie dépend essentiellement de la qualité des données collectées pour la réaliser. Pour ce faire, une stratégie de collecte de données primaires a été élaborée en partenariat avec la ville de Varennes, la bibliothèque de Varennes et les firmes spécialisées telles que Stantec, Laroche Architectes, Bureau d'études spécialisées (B.E.S) et Martin Roy et Associés (MRA). Cinq ateliers de travail ont été organisés. À chaque atelier, un jalon de collecte de données spécifiques lui a été associé. Cette planification a permis de coordonner le suivi des activités de conception des bâtiments alternatifs et la collecte des données requises à chaque étape du projet. Stantec, anciennement appelée Dessau, étant la firme d'ingénierie qui a conçu les plans du bâtiment actuel, a reçu le mandat de produire les inventaires associés à la structure du bâtiment. Les détails des calculs réalisés par la firme sont disponibles sur un chiffrier Excel, et un extrait des tableaux d'inventaire est présenté dans l'Annexe 3. Le bureau d'études spécialisées (B.E.S) a reçu à la fois le mandat de faire la conception des plans du bâtiment équivalent en bois (CLT) et de produire par le même effet, les inventaires associés à la nouvelle structure en bois. La firme d'architectes, Laroche Architectes a reçu le mandat d'adapter la conception et la composition de l'enveloppe du bâtiment selon les scénarios définis lors des ateliers de recherche. La firme Martin Roy et Associés a reçu le mandat d'exécuter les modélisations énergétiques de chaque scénario en vue d'estimer les demandes énergétiques de chaque scénario analysé. Les travaux réalisés et les livrables produits par ces firmes sont présentés en annexe (numéro d'annexe à venir).

2.3.2 **Étape de production**

L'étape de production comprend trois modules d'informations référant respectivement à l'extraction de la matière première (A1), le transport de celle-ci vers le site de transformation (A2) et la transformation de celle-ci chez le manufacturier (A3). C'est une étape fondamentale du cycle de vie des bâtiments. Ecoinvent a été utilisée comme étant la 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 US LCI et Athena Sustainable Material Institute (ASMI) ont été utilisées pour compléter les inventaires de quelques matériaux pour lesquels les processus unitaires ne sont pas disponibles dans Ecoinvent. Par exemple, les données d'inventaire relatives à la production et au transport du lamellé-croisé et du lamellé-collé ont été extraites à partir des rapports d'Athena [24, 25]. Les énergies consommées relativement à l'étape de production de la plupart des matériaux ont été modélisées et réajustées en tenant compte du bouquet énergétique (mix électrique) de la province du Québec. Par contre les énergies relatives à l'étape de transport des matériaux du site d'extraction vers le site de transformation (fabrication) ont été modélisées en utilisant la base de données nord-américaine US LCI [26].

2.3.3 Étape de construction

L'étape de construction comprend deux modules d'informations à savoir le module transport des matériaux (A4), et le module construction sur site (A5).

2.3.3.1 Transport (A4)

Le module A4 fait référence au transport des matériaux du site de production vers le site de construction, en l'occurrence, la bibliothèque de Varennes. Ce module permet de faire l'inventaire, en termes de poids de chaque matériau transporté sur une distance (en km) bien précise entre le manufacturier (ou fournisseur) et le site de construction. L'information recueillie est ensuite convertie en unité de transport exprimée en tonne-kilomètre (tkm) telle que présentée dans le Tableau 6. Le rayon de transport de tous les matériaux a été délimité au territoire du Canada en usant de l'hypothèse selon laquelle : le Canada est en mesure de produire et d'assurer l'approvisionnement de tous les matériaux essentiels à de construction du bâtiment. Ainsi, en faisant abstraction des enjeux relatifs à la compétitivité des prix/coûts d'achat des matériaux et des coûts d'acquisitions des équipements, le critère de proximité au site de construction (courtes distances) a prévalu dans la sélection des fournisseurs potentiels. Sauf indications contraires relatives aux spécificités de sécurité entourant le transport de certains matériaux délicats, le moyen de transport privilégié est le transport routier. Les distances parcourues à vide entre le site et les fournisseurs sont exclues de l'inventaire. En effet, il a été supposé que les manufacturiers utilisent les services des entreprises de logistique qui ont une certaine expertise dans l'optimisation des transports et dans l'usage optimal des ressources disponibles, réduisant ainsi les possibilités de voyages retour à vide sur de longues distances. Le Tableau 5 présente les distances moyennes parcourues par les fournisseurs pour acheminer au site de construction, les principaux matériaux.

Tableau 5. Principaux fournisseurs et distances

Fournisseurs principaux	Distance (Km)	Principaux matériaux
Alouettes	880	Aluminium
Arcelomittal	829	Acier
CGC Inc.	20	Gypse
CCM Division	38	Gravier
Heliene Inc	1 020	Panneaux solaires
Fransyl	25	Pare-air vapeur
Husky contreplaqué	60	Contreplaqués
Isolofoam Group	270	Isolants
Soprema	244	Membranes
Revêtements Adirondack	41	Revêtement bois
Unibéton	282	Béton
Nordic	702	Bois

Tableau 6. Transport (A4)

Transport (A4)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Transport*	tkm	714 767	713 920	663 961	783 051

2.3.3.2 Construction (A5)

Le module d'informations A5 permet d'estimer à la fois la quantité exacte ou quantité nette (Q_N) de matériaux consommée par le bâtiment lors de son érection et la quantité de rejets (débris et déchets) générés lors des travaux sur le terrain (ex. : bris ou débris issus des travaux de redimensionnement des panneaux de gypse ou panneaux de bois, etc.). Pour ce faire, un certain facteur (F) de rejet a été pris en compte pour refléter la quantité totale réelle (Q_T) des matériaux qui ont servi à la construction. Le Tableau 7 présente les facteurs de rejet. Le Tableau 8 présente le bilan d'inventaire des matériaux consommés par le bâtiment à l'étape A5. La quantité totale ayant été transportée au site de construction est estimée selon l'équation ci-dessous.

$$Q_T = Q_N(1 + F)$$

Le module A5 fournit aussi de l'information sur l'énergie électrique consommée sur site pour diverses activités telles que l'élévation des charges à l'aide de la grue ou à l'aide des chariots élévateurs, ou encore l'énergie nécessaire pour faire marcher la petite machinerie (perceuse, marteau piqueur, etc.). Toutefois, dans le cadre de cette étude, les données relatives à la consommation électrique durant l'étape de construction n'ont pas été collectées par manque de détails appropriés sur les équipements utilisés. De plus, du point de vue de l'analyse globale, les différences au niveau de la proportion d'électricité (kWh) consommée par chaque scénario, lors de l'étape de construction, sont jugées négligeables pour différencier les impacts des différents scénarios.

Tableau 7. Facteurs de rejet de construction

Murs extérieurs	Taux de déchets	Source
Acier calibre 18 (porte)	0 %	[27]
Armature colonnes	1 %	[27]
Barres z ajustables	1 %	[27]
Contreplaqué	5 %	[27]
Fourrures de bois	8 %	[27]
Fourrures métalliques	8 %	[27]
Gravier de sablière rond lavé 20mm 0	1 %	[27]
Gypse 16mm	1 %	[27]
Isolant giclé 100mm	5 %	[27]
Isolant polystyrène	5 %	[27]
Isolant polystyrène	5 %	[27]
Isolant semi-rigide en fibre de roche	5 %	[27]
Silicone	0 %	[27]
Lamellé-collé	0 %	[27]
Lattes de bois embouvetées 16mm x 125mm (revêtement)	8 %	[27]
Membrane autocollante	3 %	[27]
Membrane pare-air vapeur	2 %	[27]
Membrane Soprafiltre	3 %	[27]
Montants métalliques (acier)	1 %	[27]
Panneaux photovoltaïques	0 %	[27]
Pontage d'acier	1 %	[27]
Revêtement aluminium	1 %	[27]
Solin métallique (aluminium)	3 %	[27]
Suspension métallique à 1200mm c/c	1 %	[27]
Tôles pliées en j en acier galvanisé	1 %	[27]
Treillis armature pour béton	1 %	[27]
Vitre (double vitrage)	0 %	[27]

Tableau 8. Inventaire des matériaux

Murs extérieurs	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Barres en Z ajustables	kg	810	810	810	300
Fourrures de bois (19x64mm)	kg	178	178	178	226
Gypse 16mm	kg	37 421	37 421	37 421	38 884
Isolant polystyrène	kg	49	49	49	49
Isolant giclé (polyuréthane)		3 625	0	3 625	0
Isolant laine de roche		0	1 541	0	0
Isolant en fibre de bois	kg	0	0	0	35 797
Membrane autocollante	kg	1 234	1 234	1 234	1 234
Montants métalliques (acier)	kg	7 056	7 056	7 056	7,056
Revêtements métalliques (aluminium)	kg	6 122	6 122	6 122	0
Revêtements en bois	kg	0	0	0	10 191
Toiture	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué 19 mm	kg	56 930	56 930	56 930	56 930
Gravier de sablière rond lavé	kg	5	5	5	5
Isolant polystyrène	kg	0	0	0	0
Isolant giclé (polyuréthane)	kg	8 333	0	8 333	0
Isolant laine de roche	kg	0	4 397	0	0
Isolant en fibre de bois	kg	0	0	0	82 232
Membrane autocollante	kg	1 863	1 863	1 863	1 863
Membrane pare-air vapeur	kg	216	216	216	216
Membrane Soprafiltre	kg	7	7	7	7
Panneau support contreplaqué 16mm	kg	20 637	20 637	20 637	20 637
Revêtements métalliques (aluminium)	kg	11 738	11 738	11 738	11 738
Parapets	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Isolant semi-rigide en fibre de roche	kg	1 670	1 670	1 670	1 670
Contreplaqué	kg	28 795	28 795	28 795	28 795
Membrane autocollante	kg	2 111	2 111	2 111	2 111
Membrane pare-air vapeur	kg	989	989	989	989
Montants métalliques	kg	270	270	270	270
Solin métallique	kg	1 767	1 767	1 767	1 767
Plancher (sans éléments structuraux)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Isolant semi-rigide en fibre de roche	kg	1 224	1 224	0	0
Membrane pare-air vapeur	kg	91	91	0	0
Tuyaux (éléments chauffants)	kg	286	0	286	286
Soffites	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Barres en z ajustables	kg	10 101	10 101	10 101	10 101
Contreplaqué 19 mm	kg	3 704	3 704	3 704	3 704
Fourrures métalliques	kg	56	56	56	56
Isolant giclé (polyuréthane)	kg	114	0	114	0
Isolant laine de roche	kg	0	101	0	0

Isolant en fibre de bois (Gutex)	kg	0	0		1 061
Montants métalliques	kg	263	263	263	263
Revêtements métalliques (aluminium)	kg	918	918	918	0
Revêtements métalliques (HarryWood)	kg	944	944	944	
Revêtement en bois	kg	0	0	0	2261
Revêtement en bois-franc	kg	4254	425	4254	4254
Acier (suspension métallique)	kg	107	107	107	107
Acier galvanisé (tôles pliées)	kg	0	0	0	0
Retombées	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Gypse 16 mm	kg	1 154	1 154	1 154	1 154
Montants métalliques	kg	1 208	1 208	1 208	1 208
Plafonds	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué 19 mm	kg	12 487	12 487	12 487	12 487
Fourrures métalliques	kg	726	726	726	726
Gypse 16 mm	kg	37 927	37 927	37 927	37 927
Lattes de bois embouvetées	kg	6 088	6 088	6 088	6 088
Acier (suspension métallique)	kg	7 366	7 366	7 366	7 366
Allèges	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Barres en Z ajustables	kg	120	120	120	120
Contreplaqué 19mm en pente	kg	275	275	275	275
Gypse extérieur 16 mm	kg	247	247	247	247
Isolant giclé (polyuréthane)	kg	34	34	34	34
Membrane autocollante	kg	20	20	20	20
Revêtement métallique (aluminium)	kg	125	125	125	125
Murs rideaux	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Bois (lamellé-collé)	kg	2 370	2 370	2 370	2 370
Revêtement métallique (aluminium)	kg	792	792	792	792
Membrane autocollante	kg	1	1	1	1
Joints en silicone	kg	232	232	232	232
Vitre (double vitrage)	kg	8 415	8 415	8 415	8 415
Acier (autres ferrures)	kg	272	272	272	272
Portes extérieures	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Acier calibre 18	kg	873	873	873	873
Isolant polystyrène	kg	7	7	7	7
Revêtement portes (aluminium)	kg	348	348	348	348
Bois structural	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Bois (CLT)	kg	0	0	231 255	231 255
Acier charpente & armature	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Acier	kg	173 202	173 202		20 265
Béton structural	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Béton	kg	1 761 070	1761 070	1 719 446	1 719 446
Total	kg	2 229 247	2 222 928	2 244 361	2 355 260

2.3.4 Étape d'opération

L'étape d'utilisation du bâtiment comprend sept modules d'informations allant du module B1 au module B7. Ils se réfèrent respectivement à l'utilisation du bâtiment par les occupants (B1), la maintenance (B2), la réparation (B3), le remplacement (B4), la remise à neuf (B5), l'utilisation de l'énergie (B6), ainsi que l'utilisation de l'eau (B7). Pour des raisons de quasi-similarité des processus et de quasi-équivalence des données d'inventaires entre les différents scénarios analysés, les modules B1, B2 et B5 sont exclus de l'analyse.

2.3.4.1 Réparation (B3)

Les bâtiments nécessitent des réparations selon l'usure naturelle des composants du bâtiment. Dans des bâtiments correctement conçus et bien entretenus, les réparations touchent principalement l'enveloppe et non pas la structure. Les murs, les revêtements et la toiture ne devraient pas nécessiter des réparations majeures au cours de la durée de vie des bâtiments. Néanmoins, il est assez courant que les bâtiments subissent des réparations mineures périodiquement [28]. Ces réparations ont généralement lieu au niveau des surfaces exposées aux intempéries (chaud, froid, soleil, pluies, neiges, humidité, vent, etc.) et au niveau des joints situés sur les surfaces. Les matériaux les plus souvent concernés par ces réparations se résument à de la mousse polyuréthane et du silicone. Les estimations ont été faites sur la base des facteurs produits par Athena, lesquels estiment la quantité par élément de surfaces exposées aux intempéries[27].

L'inventaire relatif à la réparation usant de la mousse et du silicone est consigné dans le Tableau 9. L'inventaire inclut les quantités nettes, mais majorées par le pourcentage typique de déchets, spécifique à chaque matériau. L'acquisition des matériaux de réparation implique le transport de ceux-ci entre le lieu d'acquisition et le site de réparation. De même, la réparation sur site en tant que telle implique une certaine consommation énergétique. Toutefois, l'énergie et le transport associés à cette étape de réparation sont négligeables, étant données les faibles masses achetées et les faibles distances de transport impliquées [28].

Tableau 9. Matériaux de réparation et inventaire

Étape de réparation	Unité	Scénarios 1	Scénarios 2	Scénarios 3	Scénarios 4
Mousse polyuréthane	kg	3	3	3	3
Silicone	kg	442	442	442	442
Total	kg	445	445	445	445

2.3.4.2 Remplacement (B4)

Dans l'hypothèse d'un scénario idéal où le comportement de l'occupant n'affecte pas prématurément l'usure naturelle des composants du bâtiment, la fréquence de remplacement (FR) des matériaux varie d'un matériau à l'autre, et ce, en fonction de la durée de vie de référence (DVR) de chaque matériau. Le Tableau 10 présente les durées de vie des matériaux à remplacer. Ainsi, selon la caractéristique intrinsèque de chaque matériau en service, ainsi que la connaissance de la durée de vie de référence, la fréquence de remplacement des matériaux, tout au long de la durée de vie du bâtiment (DVB), peut être calculée selon l'équation ci-dessous.

$$FR_i = \frac{DVB - DVR_i}{DVR_i}; \text{ ou } FR_i = \frac{DVB}{DVR_i} - 1;$$

avec i , l'indice du matériau ($i = 1, 2, 3 \dots n$)

Tableau 10. Durée de vie de référence

Matériaux	Durée de vie de référence (DVR)	FRi	Source
Contreplaqué	30	1	NAHB, 2007 [29]
Fourrures de bois (19x64mm)	25	1,4	Athena, 2002[30]
Joints en silicone	20	2	German FOBRP, 2001[31]
Lattes de bois embouvetées	25	1,4	Athena, 2002 [30]
Membrane autocollante	22	1,7	CMHC, 2000 [32]
Membrane Soprafiltre	22	1,7	CMHC, 2000 [32]
Revêtement d'aluminium	45	0,3	German FOBRP, 2001[31]
Revêtements en bois (RB2)	25	1,4	Athena, 2002 [30]
Solin métallique	22	1,7	German FOBRP, 2001 [31]
Vitre (double vitrage)	20	2	German FOBRP, 2001

La variable FRi indique la fréquence de remplacement d'un matériau donné (i), la variable DVB indique la durée de vie du bâtiment, et la variable DVRi indique la durée de vie de référence d'un matériau donné (i). L'inventaire associé au module de remplacement d'un matériau donné se calcule selon l'équation ci-dessous. La variable MRI est la masse totale additionnelle à utiliser tout au long de la durée de vie du bâtiment pour remplacer le matériau (i) complément usé ou endommagé. La variable MTi quant à elle est la masse totale nette du matériau (i) qui a été utilisé initialement lors de l'érection du bâtiment.

$$MR_i = MT_i * FR_i$$

L'inventaire de ce module prend en compte le facteur de rejet pour estimer la quantité réelle de matériau à acheter pour remplacer le matériau usé. En d'autres mots, l'inventaire inclut les quantités nettes, mais majorées par le pourcentage typique de déchets spécifiques à chaque matériau.

Il est important de rappeler que dans la section 2.2.4, certains éléments du bâtiment nécessitant la maintenance et le remplacement avaient été exclus des frontières du système. Il s'agit des fournitures et des finitions intérieures (ex. : peinture, portes intérieures, cloisons intérieures, mobilier, etc.). Les données d'inventaire relatives au déplacement de la main-d'œuvre, au transport des matériaux de remplacement ainsi que l'énergie consommée pour remplacer les matériaux usés du bâtiment tout au long de son cycle de vie n'ont pas été prises en compte dans la présente étude, car elles ont été jugées négligeables [28].

Tableau 11. Inventaire des matériaux remplacés

Murs extérieurs	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Fourrures de bois (19x64mm)	kg	249	249	249	316
Membrane autocollante	kg	2 131	2 131	2 131	2 131
Revêtements métalliques (alu)	kg	2 041	2 041	2 041	0
Revêtements en bois (RB2)	kg	0	0	0	14 266
Toiture	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué 19 mm	kg	56 930	56 930	56 930	56 930
Membrane autocollante	kg	3 218	3 218	3 218	3 218
Membrane Soprafiltre	kg	12	12	12	12
Contreplaqué 16mm	kg	20 637	20 637	20 637	20 637
Revêtement métallique (alu)	kg	3 913	3 913	3 913	3 913
Parapets	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué	kg	28 794	28 794	28 794	28 794
Membrane autocollante	kg	3 645	3 645	3 645	3 645
Solin métallique	kg	3 052	3 052	3 052	3 052
Soffites	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Revêtement métallique (alu)	kg	306	306	306	306
Revêtements en bois (RB2)	kg	0	0	0	3 165
Plafonds	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué 19 mm	kg	12 487	12 487	12 487	12 487
Lattes de bois emboutées	kg	8 523	8 523	8 523	8 523
Allèges	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué 19mm en pente	kg	275	275	275	275
Revêtement métallique (alu)	kg	42	42	42	42
Murs rideaux	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Membrane autocollante	kg	3	3	3	3
Joint en silicone	kg	464	464	464	464
Vitre (double vitrage)	kg	16 830	16 830	16 830	16 830
Total	kg	163 552	163 552	163 552	179 010

2.3.4.3 Utilisation d'énergie (B6)

La bibliothèque de Varennes est un bâtiment institutionnel conçu selon les critères d'un bâtiment de type net-zéro. Idéalement, le bâtiment est censé produire autant d'énergie électrique qu'il en consomme, rendant ainsi nulle la balance nette entre l'énergie empruntée et l'énergie renvoyée à Hydro-Québec. Malheureusement, le

bilan énergétique du bâtiment actuel tel que construit montre que la balance énergétique du bâtiment n'est pas totalement nulle. En effet, après la mise en place des mesures passives pour réduire les besoins énergétiques, la demande énergétique globale du bâtiment s'élève à 156 662 kWh/an. Or, les panneaux photovoltaïques mis en place sur le toit alimentent le bâtiment avec 53 411 kWh/an et renvoient 64 837 kWh/an à Hydro-Québec, rendant ainsi déficitaire le bâtiment de 38 414 kWh/an par rapport à Hydro-Québec. La Figure 7 donne une illustration schématique des flux énergétiques du bâtiment actuel tel que construit, selon la performance mesurée et capturée en date du 31 décembre 2018.

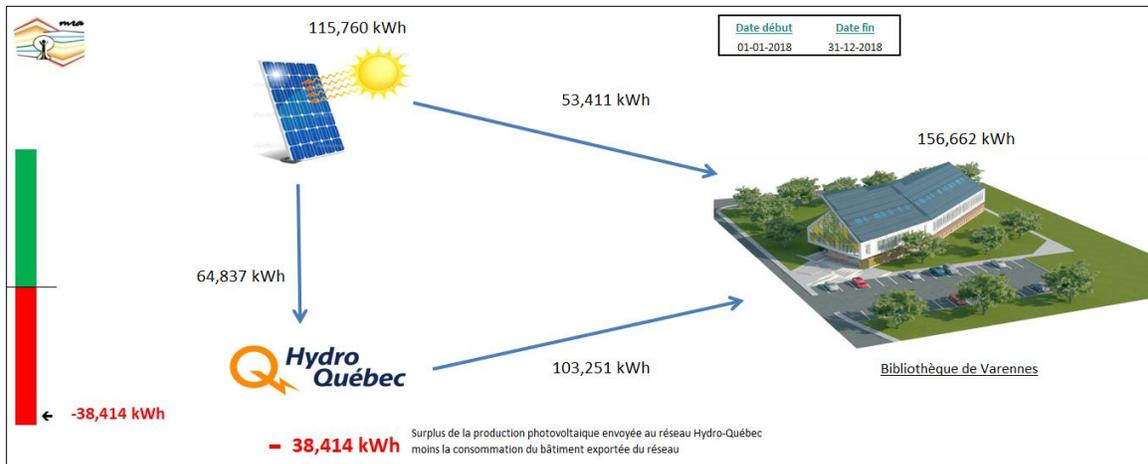


Figure 7. Flux énergétiques du bâtiment actuel (source : Martin Roy & Associés (MRA))

La consommation annuelle du bâtiment actuel et celle des différents scénarios ont été modélisées par la firme Martin Roy et Associés (MRA). Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous sont des valeurs mesurées dans le cas du bâtiment actuel et simulées dans le cas des scénarios alternatifs 2, 3 et 4.

Tableau 12. Bilan énergétique (source MRA)

Bilan énergétique	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Description	Bâtiment actuel	Référence ASHRAE	Structure bois	Structure bois ⁺
Demande énergétique (kWh)	155 172	356 744	157 764	135 057
Production PV (kWh)	122 742	-	122 742	170 224
Déficit ou Excès (kWh)	-32 430,00	-	-35 022,00	35 167,00
Production/Demande (%)	79 %	-	77 %	126 %

2.3.5 Étape de fin de vie du bâtiment

L'étape de fin de vie est divisée en quatre modules d'informations à savoir le module démolition complète du bâtiment (C1), le module de transport des matériaux issus de la démolition vers un Écocentre pour de triage (C2), le module de triage (C3), et finalement le module de gestions des déchets résultants du triage (C4).

2.3.5.1 Démolition du bâtiment (C1)

L'inventaire du cycle de vie qui caractérise ce module contient deux informations essentielles, à savoir l'énergie consommée par la machinerie lors de la démolition, et la quantité totale des matériaux démolis.

En ce qui concerne l'inventaire relatif à la quantité des matériaux après la démolition, le Tableau 13 présente les quantités totales de matériaux constituant le bâtiment, avec en plus, les déchets issus des modules de construction (A5), réparation (B3) et remplacement (B4). En effet, pour des raisons pratiques de modélisation, et en faisant abstraction des aspects temporels, les déchets quantifiés issus de A5, B3 et B5 ont été regroupés et pris en compte à ce stade de démolition, dans l'unique but de prendre en considération le transport de ces derniers vers le même centre de tri, et ce, en même temps que l'ensemble des déchets de la démolition.

Tableau 13. Poids total des matériaux après démolition

Étape de démolition	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Poids total des matériaux	tonnes	2 393	2 386	2 408	2 534

Pour ce qui est de l'énergie consommée (machinerie, équipements, carburant, mains-d'œuvre, et autres activités connexes) lors de la démolition, l'estimation a été faite en se basant sur un rapport réalisé pour Athena Sustainable Materials Institute (ASMI) par Gordon Engineering [33, 34]. En effet, l'étude réalisée par Gordon Engineering a permis d'analyser la démolition de trois scénarios de bâtiment de trois étages chacun, dont le premier à une structure en acier, le second à une structure en bois et le troisième à une structure en béton armé. Chaque scénario a été analysé sous deux contextes géographiques distincts, notamment la région de Toronto en Ontario et la région de Vancouver en Colombie-Britannique. Les valeurs moyennes des énergies de démolition par unité de masse et par unité de surface sont présentées dans le tableau ci-dessous (Tableau 14). Ces valeurs sont le résultat des scénarios de base (« Baseline ») analysés sous les conditions météorologiques idéales.

Tableau 14. Énergies de démolition en fonction du type de structure

Méthode de démolition	Structure en bois		Structure en acier		Structure en béton armé	
	MJ/m ²	MJ/kg	MJ/m ²	MJ/kg	MJ/m ²	MJ/kg
Énergie de démolition pour des fins de recyclage	118,33	0,419	110,3	0,301	103,44	0,107
Énergie de démolition pour des fins de réutilisation des matériaux	91,71	0,324	222,9	0,608	120,37	0,124

Cependant, les auteurs reconnaissent que les données d'énergie par unité de masse (MJ/kg) ont été incluses à titre informatif seulement. En effet, ils ne recommandent pas que ces facteurs soient utilisés comme indicateurs comparatifs en raison de la grande variabilité de la masse des structures étudiées. Par conséquent, les auteurs recommandent spécifiquement l'usage de l'énergie par unité de surface de plancher (MJ/m²), car selon eux, l'énergie par unité de surface constitue un bon indicateur comparatif puisque la surface brute du bâtiment reste constante (4 620 m²) d'une structure à l'autre. Les techniques de démolition et la machinerie utilisée peuvent

varier d'un site à l'autre. Ainsi, pour simplifier l'inventaire de ce module, les hypothèses essentielles à l'extrapolation et l'incorporation des facteurs fournis par Gordon Engineering sont les suivantes :

- la démolition est censée se produire dans des conditions climatiques et météorologiques idéales⁴, car il est universellement reconnu dans l'industrie de la construction, que les conditions climatiques et météorologiques défavorables entraînent une réduction de la productivité [35]. Cette hypothèse permettra l'utilisation des résultats issus du cas de base pour estimer l'énergie de démolition de chacun des scénarios analysés dans la présente étude ;
- la structure en bois sera soumise à une combinaison de recyclage et de réutilisation. Toutefois, le lamellé-collé et lamellé croisé les principaux éléments de la structure sont triés directement sur le site de démolition pour des fins de réutilisation ou de recyclage. En absence de données précises, une répartition de 50 % recyclage et 50 % réutilisation constitue une base raisonnable⁵ pour estimer les facteurs pondérés de l'énergie de démolition. Il est important de préciser que le bois structural trié à ce stade-ci et les pourcentages indiqués ci-haut ne réfèrent pas systématiquement au bois sortant des centres de tri spécialisés dont 63 % sont récupérés pour des fins de valorisation énergétique et 37 % pour des fins de recyclage tel que rapporté par Recyc-Québec [36] ;
- le béton de la structure en béton armé sera trié sur le site de démolition et envoyé à un procédé de concassage pour une réutilisation future. En d'autres mots, 100 % du béton concassé est dédié à réutilisation future ;
- l'acier de la structure sera soumis à une combinaison de recyclage et de réutilisation. Une répartition de 94 % pour la réutilisation et 6 % pour le recyclage est supposée [37].

Il est important de noter que les procédés de recyclage, les processus de revalorisation et les activités connexes en lien avec ces matériaux triés sur site sont exclus des frontières du système à l'étude. Seuls les transports de ces derniers, du site de démolition vers les sites appropriés sont pris en compte dans cette étude.

Étant donné que les scénarios analysés ont tous la même fondation, c'est-à-dire une fondation en béton armé, les structures analysées sont donc des structures mixtes (ex. : acier et béton armé ou encore béton armé et bois). Ainsi, les facteurs utilisés pour estimer les énergies de démolition des différents scénarios sont des facteurs affectés de coefficients pondérés pour prendre en compte à la fois, le caractère hybride de chaque structure ainsi que le caractère recyclable et/ou réutilisable du bois, de l'acier et du béton. Tableau 15 présente les énergies de démolition de chacun des scénarios analysés. Le bâtiment actuel et les scénarios alternatifs présentent deux étages avec une superficie de 2 230 m² par plancher, soit une superficie totale de 4 460 m². L'énergie de démolition des scénarios relatifs à une telle superficie est présentée dans le tableau ci-dessous.

⁴ « Les conditions climatiques et météorologiques idéales sont sèches, exemptes de poussières, de polluants atmosphériques et de bruits, et elles offrent une température comprise entre 10 ° C et 21 ° C avec une humidité relative (HR) comprise entre 30 % et 80 %. » Gordon Engineering, 1977.

⁵ Le CLT a récemment été introduit comme matériau structural dans la construction de grands bâtiments. Il n'y a pour l'instant aucune donnée fiable sur sa qualité après 60 ans de service. En effet, les données fournies par Recyc-Québec ces récentes années ne répertorient pas du CLT comme déchet de construction. En absence de la donnée scientifiquement fiable sur la qualité du bois structural après démolition dans les 60 ans à venir, une hypothèse de 50 % CLT recyclé et 50 % CLT réutilisé a été posée pour uniquement calculer la pondération de l'énergie à fournir pour démolir le bâtiment en fin de vie. NB : Démolir pour recycler et démolir pour réutiliser présentent deux dépenses énergétiques distinctes [Gordon Engineering]

Tableau 15. Énergie de démolition

Étape de démolition	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Énergie de démolition	GJ	538	538	439	439

2.3.5.2 Transport des matériaux vers les centres de triage, de recyclage ou de revalorisation (C2)

Ce module d'information permet de quantifier l'énergie relative au transport des débris matériaux issus de la démolition. Afin d'utiliser des données produites par Gordon Engineering, quelques hypothèses ont été formulées concernant le tri sur site de certains matériaux structuraux. Ces hypothèses corroborent avec les informations recueillies auprès des entreprises de démolition basées dans la région de Montréal et les environs [38-40]. En effet, lorsqu'un entrepreneur en démolition reçoit le mandat de démolir un bâtiment, ce dernier travaille en partenariat avec les centres de tri spécialisés en traitement d'acier, de béton et de bois. Généralement, les centres de tri, partenaires d'affaire de l'entrepreneur en démolition, déposent sur le site les conteneurs identifiés à des fins de triage sur le site. En réalité, les débris de démolition ne sont pas systématiquement acheminés à des centres de tri situés le plus près du site de démolition, car tout dépend des ententes conclues entre l'entrepreneur en démolition et les centres de tri spécialisés. Pour un bâtiment basé à Varennes, les distances de transport vers les centres de tri spécialisés peuvent varier dépendamment des choix stratégiques de l'entrepreneur responsable du projet. Il y a plusieurs centres de tri aux alentours de Varennes dans un rayon de 50 km de distance par rapport au site de démolition. Ainsi, dans le pire des scénarios, l'acier, le bois, et le béton seront acheminés à différents centres de tri situés en moyenne à 120 km du lieu de démolition.

Tableau 16. Transport des débris (acier, bois, béton)

Transport (C2)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Acier	tkm	23 354	23 354	2 570	2 509
Bois	tkm	0	0	28 035	28 035
Béton	tkm	211 328	211 328	206 334	206 334
Total	tkm	234 683	234 683	236 938	236 877

Au-delà du transport, ces matériaux ne font pas l'objet d'une évaluation supplémentaire. Cette approche d'exclusion est en accord avec l'approche méthodologique, de modélisation de l'étape de fin de vie de bâtiment, proposée par Doka dans Ecoinvent [37]. Le Tableau 16 présente les données de transport associées à ces matériaux. Le restant des débris en vrac est acheminé vers un centre de tri spécialisé en traitement des déchets de construction. Dans le cas présent, un rayon de transport de 120 km a été considéré. Le Tableau 17 présente l'inventaire associé au transport de ces matériaux en vrac.

Tableau 17. Transport vers le centre de tri

Transport (C2)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Quantité de matériaux en vrac transportée (excluant le bois, l'acier et le béton de la structure)	tonne	437	431	433	560
Total transport	tkm	52 507	51 748	52 065	67 289

2.3.5.3 Triage au centre de Tri (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 (« *bulk materials* ») acheminés au centre de tri [37]. Cette moyenne reflète essentiellement l'énergie consommée par le concasseur ou encore le broyeur hydraulique. 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 associée principalement à l'énergie consommée par les convoyeurs [37].

Mis à part la consommation électrique, le centre de tri consomme aussi beaucoup de carburant pour charger, décharger et déplacer les matériaux à trier. Plus généralement, les centres de tri utilisent des chargeurs compacts rigides (« *Skid-steer loader* »). La consommation moyenne du carburant (diesel) est estimée à 3.7 MJ/t de matériaux en vrac [37, 41]. Le Tableau 18 présente l'énergie consommée au centre du tri durant le triage.

Tableau 18. Énergies de triage au centre de tri

Énergie	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Broyeur (électrique)	GJ	6	6	6	7
Convoyeur (électrique)	(GJ)	3	3	3	4
Chargeur (Diesel)	(GJ)	2	2	2	2

2.3.5.4 Gestion et élimination

Ce module permet de quantifier les extrants du centre de tri, c'est-à-dire le taux de matériaux mis de côté pour recyclage et le taux de matériaux envoyé vers les sites d'enfouissement ou encore vers les sites d'incinération. Cependant, il est difficile d'estimer avec précision les taux appropriés au sortir du centre de tri. Selon l'étude réalisée par Doka, les déchets triés sortants du centre de tri sont classés en deux grandes catégories : les matériaux robustes (gravier, briques, etc.) et les matériaux fragiles (plâtre, mortier, etc.). Ainsi, 60 % de matériaux robustes et 15 % des matériaux fragiles sont recyclés tandis que les 40 % et 85 % restants sont acheminés vers les sites de décharges ou d'enfouissements appropriés [37, 41].

Au Québec Recyc-Québec en 2015, les résidus de construction récupérés aux sorties des centres de tri sont répartis dans des proportions suivantes (voir Tableau 19) :

- 53 % de résidus pour des fins de recyclage ou valorisation énergétique ;
- 24 % de résidus utilisés comme matériel de recouvrement alternatif ; et
- 23 % de résidus restants sont éliminés dans des décharges appropriées ou sites de disposition [17, 36].

Tableau 19. Distribution du tonnage en vrac au sortir du centre de tri

Gestion des déchets	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Résidus recyclables	tonne	232	229	230	297
Résidus (recouvrement alternatif)	tonne	105	103	104	135
Résidus pour élimination (rejets)	tonne	101	99	100	129

Du point de vue de la modélisation d'impact, les 53 % de résidus recyclables et les 24 % utilisés comme matériel de recouvrement sont exclus des frontières du système analysé. Seuls les 23 % de résidus éliminés sont modélisés dans le logiciel SimaPro, en usant du modèle d'enfouissement existant, lequel est ajusté de manière à refléter la distance entre le centre de tri spécialisé et le site de disposition. Le sondage réalisé auprès des firmes de traitements de déchets (MATREC de Boucherville et Waste Connections) qui font affaire avec l'Écocentre Margueritte d'Youville de Varennes a indiqué que toutes ces firmes acheminent leurs matières résiduelles vers le site BFI-Lachenaie. Le site BFI-Lachenaie est situé à environ 40 km de la bibliothèque de Varennes. Ainsi, en supposant que la matière résiduelle du bâtiment à l'étude transite d'abord par un centre de tri spécialisé avant d'atterrir au site BFI-Lachenaie, l'on peut estimer à 120 km la distance moyenne parcourue par les déchets à disposer. Le Tableau 20 présente les données de transport relatives à la gestion et l'élimination des matières résiduelles.

Tableau 20. Transport de la matière résiduelle vers le site de disposition

Transport des déchets	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Résidus pour élimination	tkm	12 077	11 902	11 975	15 476

2.3.6 Inventaire des éléments actifs du net-zéro

L'inventaire des éléments actifs associés aux scénarios de bâtiment net-zéro a été dissocié de l'inventaire des matériaux classiques d'un bâtiment typique. Cette dissociation a été faite pour trois raisons principales. La première raison est que tous les matériaux identifiés comme éléments actifs du net-zéro (ex. : panneaux solaires, onduleurs, ventilo-convecteurs, etc.) sont regroupés dans un ensemble de systèmes bien distincts appelés procédés. Ainsi, il y'a trois procédés implantés dans le bâtiment net-zéro de Varennes à savoir le procédé photovoltaïque, le procédé géothermique et procédé de roues thermiques (voir Tableau 21). La deuxième raison est que ces procédés sont modélisés à l'aide des données secondaires fournies par Ecoinvent. En fait, chaque système est modélisé comme un procédé de production autonome (ou de l'anglais « *standalone process* »). Cela étant dit, chaque modèle (ou de l'anglais « *proxy* ») prend en compte l'infrastructure du procédé (c.-à-d., tous les matériaux subsidiaires et leurs amortissements), la durée de vie du procédé et le démantèlement de celui-ci en fin de vie utile. La dernière raison est liée à la nécessité d'éviter le piège du double-comptage (de l'anglais « *avoiding the double-counting* ») en ACV [42]. C'est d'ailleurs pour cette raison que les débris de démolition présentés ci-haut dans la section qui traite la fin de vie du bâtiment (section 2.3.5) ne comptabilisent pas non plus le poids des éléments ou composants de ces systèmes actifs. De même, les énergies associées à la mise en place de ces systèmes ne sont pas inventoriées dans l'énergie de l'étape de construction (A5) du bâtiment. Par exemple, l'énergie pour creuser les huit puits de 150 mètres de profondeur n'est pas prise en compte dans l'inventaire A5 de l'énergie directe de la construction du bâtiment. En effet, cette

énergie est qualifiée comme énergie indirecte, car elle est intrinsèquement liée (ou encore imputée comme intrant) à la production de chaque mégajoule ou kilowattheure produit via le procédé géothermique. D'ailleurs à ce sujet, l'étude menée par l'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) présente de manière plus détaillée l'importance d'éviter le double-comptage dans l'Annexe B2 [43].

Tableau 21. Liste d'éléments actifs du net-zéro

No	Éléments supplémentaires ou éléments des mesures actives
1	Système géothermique et ses composants
1.1	Deux thermopompes eau-eau de 5 tonnes
1.2	Deux thermopompes eau-eau de 10 tonnes
1.3	Réseau de circulation et de distribution des fluides chauds et froids
2	Système photovoltaïque
2.1	428 Panneaux solaires
2.2	10 Onduleurs
2.3	Réseau de fil électrique
3	Système de roues thermiques
3.1	20 ventilo-convecteurs
3.1	Conduites de ventilation et de distribution

2.3.6.1 Procédé géothermique

La géothermie est un procédé qui utilise le principe bien connu de transfert de chaleur par écoulement à contre-courant entre un fluide caloporteur (provenant d'un milieu chaud) et un autre fluide (provenant d'un milieu à basse température). Dans ce cas-ci, le milieu chaud est représenté par le sous-sol, et le milieu à basse température est représenté par le plancher de la bibliothèque de Varennes. Généralement, même à des profondeurs de plus de 100 mètres, la température du sous-sol n'est pas suffisamment élevée pour que le fluide caloporteur atteigne les températures cibles désirées pour répondre aux objectifs de chauffage. Pour ce faire, le processus de transfert de chaleur est couplé à une ou plusieurs pompes à chaleur (ou thermopompes) qui permettent d'élever la température à un niveau suffisant pour mieux répondre aux besoins et objectifs de chauffage [44, 45].

Le procédé géothermique de la bibliothèque de Varennes est constitué de trois principales sous-unités. La première sous-unité est composée de puits souterrains hébergeant un réseau de conduites en boucle fermée, et dans lequel circulent 7900 litres d'eau et du propylène glycol à 20 %. La seconde sous-unité est constituée de quatre thermopompes de type eau-eau, dont deux de 5 tonnes et deux autres de 10 tonnes ayant la capacité nominale de 281 400 Btu/h en chauffage et 318 800 Btu/h en climatisation. La troisième sous-unité est composée d'un réseau de distribution sous-plancher appelé aussi éléments chauffants du plancher radiant.

2.3.6.2 Bilan énergétique et inventaire du procédé géothermique

La Figure 8, produite par les services de la firme Martin Roy et Associés (MRA), est le résultat d'une simulation énergétique comparative d'un bâtiment actuel tel que construit avec son équivalent conventionnel soumis au code minimal des normes énergétiques, en l'occurrence les normes de l'« *American Society of Heating,*

Refrigerating and Air Conditioning Engineers » (ASHRAE 90.1-2010). La figure montre que la demande énergétique de la bibliothèque aurait été de 356 744 kWh/an, si (et seulement si) celle-ci n'avait pas été conçue selon les mesures actives et passives relatives aux exigences normatives du net-zéro. Cela étant dit, l'intégration de ces mesures actives a généré une économie au niveau des besoins énergétiques globaux de l'ordre de 56,5 % par rapport au scénario de référence ASHRAE. Soit une demande annuelle en électricité réduite à 155 172 kWh/an (valeur mesurée) pour le bâtiment actuel. Cette demande est couverte en partie par l'électricité produite sur site (122 742 kWh/an) et une autre par le mix électrique du Québec (32 430 kWh/an) (voir Tableau 12). Cela étant dit, la baisse de la demande en chauffage et climatisation est créditée au système géothermique, voir Figure 8. La capacité de production d'énergie produite par le système géothermique est estimée à 149 817 kWh/an dans le cas du scénario de base. Dans le cas des scénarios bois et bois+, les demandes en électricité ont été estimées respectivement à 157 764 kWh/an et 135 057 kWh/an (voir Tableau 12), et les capacités du procédé géothermique pour ces deux scénarios sont respectivement 149 221 kWh/an et 154 444 kWh/an. Le Tableau 22 présente le bilan énergétique de production annuelle du procédé, et le Tableau 23 présente le sommaire de l'inventaire du procédé par unité de production. Le tableau affiche à la ligne infrastructure la prise en compte de la portion d'infrastructure imputable à la production de chaque kilowattheure (Source : Ecoinvent v3.3).

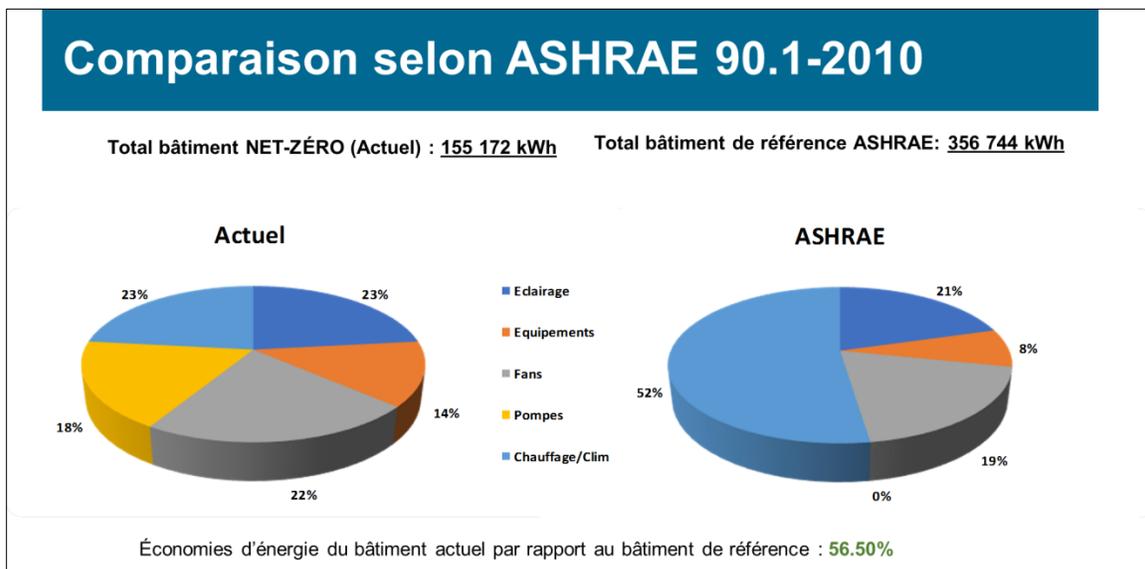


Figure 8. Comparaison de la distribution des besoins énergétiques des deux types de bâtiments (Source MRA)

Tableau 22. Bilan d'énergie du procédé géothermique

Procédé géothermique	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Procédé géothermique	kWh/an	149 817	0	149 221	154 444

Tableau 23. Inventaire du procédé géothermique (source : Ecoivent v3.3)

Intrants du procédé	Valeur	Unité	Modèles utilisés dans SimaPro	Référence
Produit : Énergie				
Production d'énergie	1	kWh	Electricity, (WECC, US only) electricity production, deep geothermal Alloc Def, U_Netzero	Ecoivent v3.3
Ressource naturelle				
Énergie géothermale	7,14	MJ	Energy, geothermal, converted	Ecoivent v3.3
Matières				
Benzène	3,05E-06	kg	Benzene (GLO) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Infrastructure				
Procédé géothermique	5,78E-10	p	Geothermal power plant, 5.5MWel (GLO) market	Ecoivent v3.3
Extrants (émissions dans l'air)				
Benzène	3,05E-06	kg	Benzene	Ecoivent v3.3

2.3.6.3 Procédé photovoltaïque

Un procédé photovoltaïque est un procédé qui utilise le rayonnement solaire comme source d'énergie primaire et le converti en énergie électrique grâce à des capteurs incorporés dans des panneaux solaires. La clé de voute de ce procédé repose sur la multitude des cellules photovoltaïques (ou capteurs) lesquelles convertissent, par effet photoélectrique, les ondes électromagnétiques issues du rayonnement solaire en courant électrique continu [46, 47]. Le système solaire de la bibliothèque de Varennes est constitué de 428 panneaux solaires de 260 W chacun et couvrant 710 m² de toit. Chaque panneau compte soixante cellules photovoltaïques monocristallines. Le système opère avec 10 onduleurs mis en place pour permettre la connexion au réseau d'Hydro-Québec. Le système est aussi composé d'un réseau de fil électrique assurant les connexions entre cellules photovoltaïques et la distribution du courant produit (voir Tableau 2).

2.3.6.4 Bilan d'énergie et inventaire du procédé photovoltaïque

La capacité de production annuelle du procédé photovoltaïque selon chaque scénario a été présentée plus haut au Tableau 12. Le Tableau 24 présente le sommaire de l'inventaire du procédé par unité de production. Le tableau montre aussi qu'une portion de l'infrastructure imputable à la production de chaque kilowattheure est prise en compte.

Tableau 24. Inventaire du procédé photovoltaïque (source : Ecoinvent v3.3, Report [47])

Intrants du procédé	Valeur	Unité	Modèles utilisés dans SimaPro	Référence
Produit : Énergie				
Production d'énergie	1	kWh	Electricity, low voltage (CA-QC) electricity production, photovoltaic	[47]
Ressource naturelle				
Énergie solaire	3,85	MJ	Energy, solar, converted	[47]
Matières				
Eau	2,55E-05	kg	Tap water (CA-QC) market for Alloc Def, U	[47]
Infrastructure				
Procédé photovoltaïque	5,78E-08	p	Photovoltaic plant, 570kWp, multi-Si, on open ground (GLO) market for Alloc Def, U	[47]
Extrants (émissions dans l'air)				
Eau	3,83E-09	m ³	Water/m ³	[47]
Déchets (émissions dans l'eau)				
Eau usée	2,55E-08	m ³	Wastewater, from residence (RoW) market for wastewater	[47]

2.3.6.5 Système de roues thermiques

La roue thermique est un procédé qui a été mis en place pour récupérer l'air chaud sous les panneaux solaires installés sur toit du bâtiment. C'est un système de récupération d'énergie (de l'anglais « *energy-saving system* ») qui autrement aurait été perdue. En général, la roue thermique joue le rôle d'échangeur de chaleur de type air-air, par ventilation, séparant le milieu chaud et le milieu froid[48]. En effet, l'intégration du système est faite en sorte que la demi-surface de la roue est en contact direct avec l'air chaud évacué et l'autre avec l'air froid qui doit être chauffé. Ainsi, pendant l'hiver, la chaleur dégagée par les panneaux photovoltaïques est ventilée vers l'intérieur du bâtiment. Tandis que pendant l'été celle-ci est ventilée à l'extérieur. Le système de roues thermiques installé à la bibliothèque de Varennes est composé de vingt (20) ventilo-convecteurs et d'un réseau de circulation et de distribution d'air.

2.3.6.6 Bilan d'énergie et inventaire du système de roues thermiques

En appliquant le même raisonnement mathématique que celui expliqué à la section précédente (section 2.3.6.2), les bilans de production annuelle des roues thermiques sont estimés et présentés dans le Tableau 25. Par contre les tableaux suivants (Tableau 26 et Tableau 27) présentent les inventaires associés au procédé. Le Tableau 26 affiche la prise en compte de l'aire d'occupation de l'espace industriel, et le Tableau 27 montre que la portion d'infrastructure imputable à la production d'un mégajoule a aussi été prise en compte dans l'inventaire.

Tableau 25. Bilan d'énergie du procédé de roues thermiques

Procédé de roues thermiques	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Procédé de roues thermiques	MJ/an	121 117	0	119 064	137 048

Tableau 26. Inventaire du procédé de la roue thermique (source : Ecoivent v3.3)

Intrants du procédé	Valeur	Unité	Modèles utilisés dans SimaPro	Référence
Produit : Énergie				
Énergie économisée par système de ventilation	1	MJ	Energy saving (RoW) from ventilation system, 1 x 720 m ³ /h, polyethylene ducts, with heat exchanger	Ecoivent v3.3
Matières				
Ventilation, occupation, espace industriel	2,93E-02	m2a	Ventilation of dwellings, central, 1 x 720 m3/h (GLO) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3

Tableau 27. Suite de l'inventaire du procédé de la roue thermique (source : Ecoivent v3.3)

Intrants du procédé	Valeur	Unité	Modèles utilisés dans SimaPro	Référence
Produit : Occupation, espace industriel				
Occupation, espace industriel	1	m2a		Ecoivent v3.3
Matières				
Flexible duct, aluminium/PET,	5,13E-04	m	Flexible duct, aluminium/PET, DN of 125 (GLO) Alloc Def, U	
Infrastructure				
Ventilation system,	2,56E-05	p	Ventilation system, central, 1 x 720 m3/h, polyethylene ducts,	Ecoivent v3.3
Blower and heat exchange unit,	5,13E-05	p	Blower and heat exchange unit, central, 600-1200 m3/h (GLO)	Ecoivent v3.3
Silencer, steel,	1,03E-04	p	Silencer, steel, DN 315, 50 mm (GLO) Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Air filter, in exhaust air valve	2,26E-02	p	Air filter, in exhaust air valve (GLO) Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Ventilation control and wiring,	5,13E-05	p	Ventilation control and wiring, central unit (GLO) Alloc Def, U	
Silencer, steel, DN 125 GLO	6,15E-04	p	Silencer, steel, DN 125 (GLO) Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Air filter	2,51E-03	p	Air filter, central unit, 600 m3/h (GLO) Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Énergie (Électricité/Chaleur)				
Électricité, basse tension	3,56E-02	kWh	Electricity, low voltage (AU) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	1,49E-01	kWh	Electricity, low voltage (RU) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	3,32E-02	kWh	Electricity, low voltage (TR) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	5,98E-01	kWh	Electricity, low voltage (Europe without Switzerland)	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	3,80E-02	kWh	Electricity, low voltage (RAF) market group for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	1,28E+00	kWh	Electricity, low voltage (RAS) market group for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	1,38E-01	kWh	Electricity, low voltage (RLA) market group for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	6,93E-01	kWh	Electricity, low voltage (RNA) market group for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3
Électricité, basse tension	3,86E-01	kWh	Electricity, low voltage (RoW) market for Alloc Def, U	Ecoivent v3.3

Traitement de déchets				
Filtre à air usagé	2,26E-02	p	Used air filter in exhaust air valve (RoW)	Ecoivent v3.3
Contrôleur de ventilation usagé	5,13E-05	p	Used ventilation control and wiring central unit (RoW)	Ecoivent v3.3
Souffleur usagé	5,13E-05	p	Used blower and heat exchange unit central, 600-1200 m3/h (RoW)	Ecoivent v3.3
Silencieux usagé en acier, DN 125	6,15E-04	p	Used silencer steel, DN 125 (RoW)	Ecoivent v3.3
Silencieux usagé en acier, DN 315	1,03E-04	p	Used silencer steel, DN 315 (RoW)	Ecoivent v3.3
Conduit flexible usagé	5,13E-04	m	Used flexible duct aluminium/PET, DN of 125 (RoW)	Ecoivent v3.3
Unité centrale de filtre à air usagée	2,51E-03	p	Used air filter central unit, 600 m3/h (RoW)	Ecoivent v3.3

2.3.7 Analyse de la qualité de données et modélisation des processus

2.3.7.1 Analyse de l'inventaire et agrégation des données

Cette section présente successivement de manière agrégée les tableaux de chaque étape de cycle de vie et les modèles utilisés dans SimaPro pour modéliser l'impact des inventaires. Une sommation des quantités a été faite au niveau des matériaux du Tableau 8. Certains matériaux sont dissociés en fonction de leur application. Par exemple, l'acier structural et l'acier pour montants métalliques n'ont pas été regroupés sous la même appellation « d'acier ». Il en est de même pour le bois de structure qui a été dissocié du bois incorporé dans l'enveloppe du bâtiment et d'autres éléments en bois (ex. : revêtements en bois, fourrures en bois, contreplaqué, Lattes et isolant en panneaux de fibre de bois). Pour ce qui est du reste des matériaux, la sommation et le regroupement ont été systématiques. Le Tableau 31 présente la liste des matériaux qui ont été utilisés pour modéliser les impacts dans SimaPro. Le Tableau 32 quant à lui présente une analyse de contribution des intrants sur une base massique. Tous scénarios confondus, l'analyse de contribution montre qu'il y a très peu de matériaux qui présentent un pourcentage de contribution supérieur à 1 %. Si le critère seuil d'exclusion de 1 % ou 3 % sur une base massique avait été appliqué, l'analyse d'impact se serait focalisée sur quatre ou 5 matériaux seulement par scénario analysé. Une telle analyse aurait été biaisée.

2.3.7.2 Qualité des données primaires et analyse qualitative de l'incertitude

Étant donné que toutes les données essentielles ont été collectées et présentées, il est important de s'attarder sur la qualité des données avant de procéder à la modélisation des impacts. En effet, la qualité des résultats repose essentiellement sur la qualité des données utilisées comme intrants aux modèles. Les données primaires ont été collectées avec l'aide des professionnels et experts dans leurs domaines respectifs.

Données des étapes A1-A3 (Bilan des matériaux) et B6 (bilan énergétique)

Les bilans ont été réalisés grâce au travail des ingénieurs, architectes et experts en modélisation énergétique. Ils ont utilisé des outils et technologies appropriés (ex. : outils de simulation de contraintes et de forces de cisaillement, outils de conception et dimensionnement, outils de modélisation par éléments finis, outils de modélisation énergétique, etc.), et ce, dans le respect du code du bâtiment et des normes en vigueur au Canada et au Québec. Que ce soit pour l'évaluation du bâtiment tel que construit ou pour l'évaluation des bâtiments alternatifs, le niveau de technicité et les hypothèses appliquées sont quasiment les mêmes.

Cela étant dit, les données utilisées et comparées ont été collectées avec une même approche et un même degré de précision. Autrement dit, s'il y a de l'incertitude liée à chaque donnée de cette catégorie, la propagation de celle-ci s'amenuise à mesure que la comparaison est faite sur les données de même origine. Toutefois, il est important de reconnaître que les travaux de conception, de dimensionnement et d'estimation qui ont été faits dans cette étude se situent entre l'étape de conception d'un projet et l'étape de réalisation d'un projet, en l'occurrence un projet de construction. Ainsi, l'incertitude sur la précision des estimations varie entre l'ingénierie préliminaire (ou étude de faisabilité d'un projet) et l'ingénierie détaillée (étape d'exécution)[49, 50]. Selon le cône d'incertitude (à trois niveaux d'incertitude: élevé, moyen, et faible) défini par McConnell, le niveau d'incertitude d'une conception théorique se situe dans la zone moyenne ($\pm 50\%$)[49]. Or, les estimations et les adaptations, réalisées par les ingénieurs et des architectes au cours de cette étude, ont été faites sur la base des plans et devis d'un bâtiment déjà conçu. En prenant en compte cet aspect, le niveau d'incertitude lié aux données collectées est moins important que dans un cas purement théorique. Celui-ci peut être classé dans la zone de faible incertitude ($\pm 30\%$).

Données des étapes de transport (A4 et C2)

Les données recueillies à cette étape sont obtenues par une simple multiplication entre la distance parcourue et la quantité de matériaux estimée. La fiabilité de la donnée et l'incertitude sur celle-ci dépendent des calculs faits en amont de chacune de ces étapes.

Données de l'étape A5

Les données de cette étape se limitent essentiellement à la collecte des pourcentages de déchets générés pendant la construction. Ces facteurs sont fournis par Athena [27]. La qualité de cette donnée dépend de la source et de la donnée initiale recueillie en A1-A3.

Données de l'étape B3 et B4

La qualité des données de ces deux étapes dépend de l'information recueillie sur la durée de vie des matériaux et de la donnée initiale recueillie en amont lors du bilan des matériaux A1-A3 [28, 29, 32].

Données de l'étape C1 et C2

Les données associées à ces deux étapes sont essentiellement les bilans d'énergie : énergie de démolition et énergie de triage. Ces données ont été estimées sur la base des facteurs énergétiques exprimés par unité de surface pour l'énergie de démolition et par unité de masse pour les énergies de triage. La qualité de ces deux types de données intrinsèquement liées aux sources utilisées à savoir Gordon Engineering (Athena) [34] et Doka (Ecoinvent) [41].

2.3.7.3 Évaluation qualitative des données primaires secondaires

Les données primaires et secondaires ont été évaluées qualitativement selon la matrice d'évaluation proposée par Weidema et al.[51]. Le Tableau 28 et le Tableau 29 présentent respectivement les indicateurs de qualité de données et les critères d'évaluation. Les tableaux (Tableau 33, Tableau 34, Tableau 35, Tableau 36, Tableau 37, Tableau 38, Tableau 39, et Tableau 40) présentent les évaluations selon les indicateurs et critères présentés ci-dessus. Étant donné que les données des quatre scénarios ont les mêmes sources seules les données du scénario de base qui ont été reportées à titre d'exemple pour l'évaluation, dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 28. Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al.[51])

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

Tableau 29. Critères évaluation qualitative de la qualité des données (adaptés de Weidema et al.[51])

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

Les évaluations de chaque donnée individuelle montrent qu'aucune d'elles ne présente la qualité optimale désirée (1, 1, 1, 1, 1), et aucune d'elles non plus ne présente la pire qualité redoutée (4, 4, 4, 4, 4). La qualité globale de chaque donnée traitée dans cette étude n'est ni très excellente, ni très mauvaise non plus. Néanmoins, il faut reconnaître qu'il y a de l'incertitude sur chaque donnée collectée. Toutefois, sans une analyse approfondie de ces incertitudes, il est impossible de dire à quel point celles-ci affectent la qualité des résultats. Il aurait été souhaitable, si le temps le permettait, de recourir à la simulation Monte-Carlo incorporée dans SimaPro.

En effet, Monte-Carlo est une approche qui consiste à attribuer à chaque donnée collectée une valeur minimale (ex. : -30 %) et valeur maximale (ex. : +30 %). Cette attribution permet à SimaPro d'assigner à chaque variable

d'entrée (donnée collectée) une fonction de densité de probabilité (ex. : une distribution ou une loi triangulaire). Ainsi, la simulation Monte-Carlo sous SimaPro permet d'obtenir au final une distribution normale pour chaque indicateur environnemental (ex. : réchauffement climatique). À défaut d'utiliser de la simulation Monte-Carlo sous SimaPro, l'étude réalisée par Humbert et al., a été utilisée comme base de référence pour prendre en compte l'affectation des résultats par l'incertitude[52] (voir section 2.3.7.4).

2.3.7.4 Effets des incertitudes sur les résultats

Compte tenu des incertitudes associées aux données collectées, et les incertitudes intrinsèquement liées aux modèles utilisés pour évaluer les impacts, les réductions d'impacts occasionnées par une comparaison de deux scénarios donnés ne peuvent être considérées comme significatives qu'à partir d'un certain degré. Autrement dit, pour qu'un écart relatif entre deux scénarios soit considéré comme étant important, il doit être supérieur à un certain intervalle minimal seuil. Les écarts minimaux requis sont illustrés dans le Tableau 30 [52].

Ces écarts sont le résultat d'une étude portant sur l'évaluation des différences minimales requises entre les processus non corrélés pour observer une différence significative selon la méthode IMPACT2002+[52]. TRACI et IMPACT 2002+ sont deux méthodes qui peuvent produire des résultats dont les ordres de grandeur des valeurs absolues peuvent être différents, mais en valeurs relatives, c.-à-d., en pourcentage (%), les écarts produits par les deux méthodes demeurent consistants entre les scénarios comparés[53, 54]. Bien qu'une classification similaire des écarts n'ait pas encore été produite dans TRACI, l'utilisation de ces différences minimales peut être transposée et utilisée pour les indicateurs similaires générés avec la méthode TRACI. Le tableau ci-dessous présente les catégories d'impacts similaires entre TRACI et IMPACT 2002+, ainsi que les écarts minimaux affectés à chaque catégorie [52].

Tableau 30. Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative

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

Tableau 31. Données agrégées

Le total des matériaux	Numéro	Lettre	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Acier	1	A	kg	194 618	194 618	21 416	20 906
Béton	2	B	kg	1 761 070	1 761 070	1 719 446	1 719 446
Bois structure	3	C	kg	2 370	2 370	233 625	233 625
Contreplaqué	4	D	kg	122 828	122 828	122 828	122 828
Fourrures	5	E	kg	960	960	960	1008
Gravier	6	F	kg	5	5	5	5
Gypse	7	G	kg	76 749	76 749	76 749	76 749
Isolant en fibre de bois	8	H	kg	0	0	0	11 9090
Isolant giclé	9	I	kg	12 106	34	12 106	34
Isolant laine de roche	10	J	kg	0	6 039	0	0
Isolant Propylène	11	K	kg	56	56	56	56
Isolant semi-rigide	12	L	kg	2 894	2 894	1 670	1 670
Silicone	13	M	kg	232	232	232	232
Lattes	14	N	kg	6 088	6 088	6 088	6 088
Membrane autocollante	15	O	kg	5 229	5 229	5 229	5 229
Membrane pare-air vapeur	16	P	kg	1 296	1 296	1 205	1 205
Membrane Soprafiltre	17	Q	kg	7	7	7	7
Montants métalliques	18	R	kg	8 797	8 797	8 797	8 797
Revêtements en bois	19	S	kg	4 254	4 254	4 254	16 706
Revêtements métalliques (Alu.)	20	T	kg	20 987	20 987	20 987	12 878
Vitre	21	U	kg	8 415	8415	8 415	8 415
Tuyaux (éléments chauffants)	22	V	kg	286	0	286	286
Total bâtiment			kg	2 229 247	2 222 928	2 244 361	2 355 260

Tableau 32. Analyse de contribution massique et pertinence du critère seuil

Le total des matériaux	Numéro	Lettre	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Acier*	1	A	%	8,67 %	8,70 %	0,88 %	0,82 %
Béton*	2	B	%	79,21 %	79,44 %	76,82 %	73,46 %
Bois structure*	3	C	%	0,11 %	0,11 %	10,44 %	9,98 %
Contreplaqué*	4	D	%	5,52 %	5,54 %	5,49 %	5,25 %
Fourrures	5	E	%	0,04 %	0,04 %	0,04 %	0,04 %
Gravier	6	F	%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Gypse*	7	G	%	3,45 %	3,46 %	3,43 %	3,28 %
Isolant en fibre de bois *	8	H	%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	5,09 %
Isolant giclé	9	I	%	0,54 %	0,00 %	0,54 %	0,00 %
Isolant laine de roche	10	J	%	0,00 %	0,27 %	0,00 %	0,00 %
Isolant Propylène	11	K	%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Isolant semi-rigide	12	L	%	0,13 %	0,13 %	0,07 %	0,07 %
Silicone	13	M	%	0,01 %	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Lattes	14	N	%	0,27 %	0,27 %	0,27 %	0,26 %
Membrane autocollante	15	O	%	0,24 %	0,24 %	0,23 %	0,22 %
Membrane pare-air vapeur	16	P	%	0,06 %	0,06 %	0,05 %	0,05 %
Membrane Soprafiltre	17	Q	%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Montants métalliques (acier)	18	R	%	0,40 %	0,40 %	0,39 %	0,38 %
Revêtements en bois	19	S	%	0,00 %	0,00 %	0,00 %	0,71 %
Revêtements métalliques (Alu.)	20	T	%	0,94 %	0,95 %	0,94 %	0,00 %
Vitre	21	U	%	0,38 %	0,38 %	0,38 %	0,36 %
Tuyaux (éléments chauffants)	22	V	%	0,01 %	0,00 %	0,01 %	0,01 %
Total bâtiment				100 %	100 %	100 %	100 %

* Les cellules colorées présentent les matériaux ayant une contribution supérieure à 1 %.

Tableau 33. Analyse de la qualité des données primaires (A1 –A3)

Étape de production (A1-A3) - Scénario de base															
Matériau*	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Outils (AutoCAD plans et fiches techniques)	Unité du facteur de mise à l'échelle	Donnée mise à l'échelle	Unité de la donnée mise à l'échelle	Processus de modélisation**	Facteur mise à l'échelle	Qualité de la donnée brute					Note
										Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
1	194 618	kg	Stantec/B.E.S	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	A	s/o	2	1	1	2	2	
2	1 761 070	kg	Stantec/B.E.S	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	B	s/o	2	1	1	2	2	
3	2 370	kg	FPI/L.A/B.E.S	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	C	s/o	2	1	1	2	2	
4	122 828	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	D	s/o	2	1	1	2	2	
5	960	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	E	s/o	2	1	1	2	2	
6	5	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	F	s/o	2	1	1	2	2	
7	76 749	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	G	s/o	2	1	1	2	2	
8	0	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	H	s/o	2	1	1	2	2	
9	12 106	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	I	s/o	2	1	1	2	2	
10	0	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	J	s/o	2	1	1	2	2	
11	56	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	K	s/o	2	1	1	2	2	
12	2 894	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	L	s/o	2	1	1	2	2	
13	232	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	M	s/o	2	1	1	2	2	
14	6 088	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	N	s/o	2	1	1	2	2	
15	5 229	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	O	s/o	2	1	1	2	2	
16	1 296	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	P	s/o	2	1	1	2	2	
17	7	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	Q	s/o	2	1	1	2	2	
18	8 797	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	R	s/o	2	1	1	2	2	
19	4 254	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	S	s/o	2	1	1	2	2	
20	20 987	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	T	s/o	2	1	1	2	2	
21	8 415	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	U	s/o	2	1	1	2	2	
22	286	kg	FPI/L.A	A.CAD, P, FT	s/o	s/o	s/o	V	s/o	2	1	1	2	2	

*À chaque numéro, un nom de matériau y est attribué ;

**À chaque lettre d'alphabet, un processus y est associé (voir Tableau ci-dessous)

FPI : FPIInnovations ; L.A : Laroche Architectes ; B.E.S : Bureau d'études spécialisées

Tableau 34 Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3)

EXTRACTION ET PRODUCTION (A1-A3) - SCÉNARIO 1: BÂTIMENT TEL QUE CONSTRUIT										
Matériau*	Processus de modélisation (de A à V)	Base de données ou source	Localisation géographique	Année	Évaluation processus					
					Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	Note
A	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production,	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2016	3	1	1	2	2	
B	Concrete, 30-32MPa (CA-QC) concrete production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2016	3	1	1	2	2	
C	Proxy Ecoinvent de Glulam, adapté en CLT selon les données d'Athena	Ecoivent/Athena[24]	Canada	2013	3	2	1	2	2	
D	Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	USLCI	É.U	2000	2	4	2	2	2	
E	Lumber, softwood, borate treated, PNW/m3/RNA	USLCI	A. du Nord	2001	1	4	2	2	2	
F	Gravel, crushed (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2014	3	1	1	2	2	
G	Gypsum wallboard product, type X, 0.625 inch (15.875 mm)/m2/RNA	USLCI	A. du Nord	2010	1	3	2	2	2	
H	Processus créé selon les données de FPIInnovations [Mahalle et al]	FPI[54]	Canada	2016	1	1	1	2	2	
I	Polyurethane, rigid foam (RoW) production	Ecoivent v3.3	Mondiale	2016	1	1	4	2	2	
J	Rock wool, fleece, production mix, at plant/ RER	ELCD	Europe	2016	2	1	3	2	2	
K	Polystyrene, extruded (CA-QC) polystyrene production,	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2014	3	1	1	2	2	
L	Polyol ether, for rigid foam polyurethane production, at plant/RNA	USLCI	A. du Nord	2016	3	1	2	2	2	
M	Silicon, multi-Si, casted (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2013	1	1	1	2	2	
N	Sawn lumber, softwood, rough, green, at sawmill, INW/kg/RNA	USLCI	A. du Nord	2007	2	1	2	2	2	
O	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant (CA-QC)	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2013	3	1	1	2	2	
P	PET film (production only) E	Ecoivent v3.3	Europe	2007	3	1	3	2	2	
Q	PET film (production only) E	Ecoivent v3.3	Europe	2007	3	1	3	2	2	
R	Steel, low-alloyed (CA-QC) steel production,	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2016	3	1	1	2	2	
S	Wood cladding, softwood (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2015	3	1	1	2	2	
T	Aluminium alloy, ALi (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2016	3	1	1	2	2	
U	Glazing, double, U<1.1 W/m2K (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Quebec, CA	2016	3	1	1	2	2	
V	Extrusion, plastic pipes (RoW) production	Ecoivent v3.3	Mondiale	2016	3	1	4	2	2	

Tableau 35 Analyse de la qualité des données primaires (A4, B3, B4)

Étape de transport A4 à l'étape de remplacement B4																	
Étapes de cycle vie du bâtiment	Élément	Type : Matériau / Énergie / Transport	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Facteur mise à l'échelle	Unité du facteur de mise à l'échelle	Donnée mise à l'échelle	Unité de la donnée mise à l'échelle	Processus de modélisation	Base de données	Qualité de la donnée brute					Note
												Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
TRANSPORT DES MATÉRIAUX (A4)																	
Transport	T		714 767	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	A4.1	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Mousse p.																	
Mousse p.	M.		3	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B3.1	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Silicone																	
Silicone	M.		442	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B3.2	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Contreplaqué																	
Contreplaqué	M.		119 123	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.1	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Fourrures																	
Fourrures	M.		249	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.2	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Silicone																	
Silicone	M.		464	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.3	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Lattes																	
Lattes	M.		8 523	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.4	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Membrane A.																	
Membrane A.	M.		8 997	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.5	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Membrane S																	
Membrane S	M.		12	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.6	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Revêtements (Alu)																	
Revêtements (Alu)	M.		6 301	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.7	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Revêtements (bois)																	
Revêtements (bois)	M.		0	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.8	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Solin																	
Solin	M.		3 052	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.9	Tableau 36	2	1	1	2	2	
Vitre (double)																	
Vitre (double)	M.		16 830	kg	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	B4.10	Tableau 36	2	1	1	2	2	

Tableau 36 Analyse de la qualité des données secondaires (A4, B3, B4)

Étape de transport A4 à l'étape de remplacement B4											
Étapes de cycle vie du bâtiment	Type : Matériau/ Énergie/ Transport	Processus modélisés	Base de données	Localisation géographique	Année	Qualité du processus					Note
						Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
TRANSPORT DES MATÉRIAUX (A4)											
A4.1	Transport	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
ÉTAPE D'UTILISATION (B3)											
B3.1	M.	Polyurethane, rigid foam (RoW) production	Ecoivent	Mondiale	2016	1	1	4	4	2	
B3.2	M.	Silicon, multi-Si, casted (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2013	1	1	1	2	2	
ÉTAPE D'UTILISATION (B4)											
B4.1	M.	Plywood, at plywood plant, US SE/kg/US	USLCI	É.U	2000	2	4	2	2	2	
B4.2	M.	Lumber, softwood, treated, PNW/m3/RNA	USLCI	Am. du Nord	2001	1	4	2	2	2	
B4.3	M.	Silicon, multi-Si, casted (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2013	1	1	1	2	2	
B4.4	M.	Sawn lumber, softwood, at sawmill, INW/kg/RNA	USLCI	Am. Du Nord	2007	2	1	2	2	2	
B4.5	M.	Wood cladding, softwood (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2015	3	1	1	2	2	
B4.6	M.	Aluminium alloy, ALi (CA-QC) production	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2016	3	1	1	2	2	
B4.7	M.	Glazing, double, U<1.1 W/m2K (CA-QC)	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2016	3	1	1	2	2	

Tableau 37. Analyse de la qualité des données primaires (B6)

Étape d'utilisation d'énergie																	
Étapes de cycle vie du bâtiment	Élément	Type : Matériau / Énergie / Transport	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Outils de calcul : Logiciel	Unité du facteur de mise à l'échelle	Donnée mise à l'échelle	Unité de la donnée mise à l'échelle	Processus de modélisation	Base de données	Qualité de la donnée brute					Note
												Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
ÉTAPE D'UTILISATION D'ÉNERGIE (B6)																	
Prod. Hydro		E.	34 430	kWh	MRA/FPI	L	S/o	S/o	S/o	B6.1	Tableau 38	2	1	1	2	2	
Production PV		E.	122 742	kWh	MRA/FPI	L	S/o	S/o	S/o	B6.2	Tableau 38	2	1	1	2	2	
Production GT		E.	539 342	kWh	MRA/FPI	L	S/o	S/o	S/o	B6.3	Tableau 38	2	1	1	2	2	
Production RT		E.	121 177	kWh	MRA/FPI	L	S/o	S/o	S/o	B6.4	Tableau 38	2	1	1	2	2	

PV: Photovoltaïque; GT: Géothermique, RT : Roue thermique; FPI : FPIInnovations; MRA : Martin Roy et Associés

Tableau 38. Analyse de la qualité des données secondaires (B6)

Étape d'utilisation d'énergie																	
Étapes de cycle vie du bâtiment	Énergie / Transport	Processus modélisés	Base de données	Localisation géographique	Année	Qualité du processus					Note						
						Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité							
ÉTAPE D'UTILISATION D'ÉNERGIE (B6)																	
B6.1	E.	Electricity, low voltage (CA-QC) electricity voltage transformation	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2016	1	1	1	2	2							
B6.2	E.	Electricity, low voltage (CA-QC) electricity production, photovoltaic	Ecoivent v3.3	Québec, CA	2016	3	1	1	2	2							
B6.3	E.	Energy saving (RoW) from ventilation system,	Ecoivent v3.3	Mondial	2016	3	1	4	2	2							
B6.4	E.	Electricity, high voltage (WECC, US only) electricity production, deep geothermal	Ecoivent v3.3	É.U	2015	3	2	2	2	2							

Tableau 39. Analyse de la qualité des données primaires (C1-C3)

Étape de fin de vie (C1-C3)																	
Étapes de cycle vie du bâtiment	Élément	Type : Énergie / Transport/Résidus	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Facteur mise à l'échelle	Unité du	Donnée mise à l'échelle	Unité	Processus de modélisation	Base de données	Qualité de la donnée					Note
												Technologies	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
ÉTAPE DE FIN DE VIE (ÉNERGIE)																	
Énergie de démolition	E.	120,69	MJ/m ²	G. E & AT	4460	m ²	538	GJ	C1.1	Tableau 40	1	3	1	2	2		
Broyeur (électrique)	E.	3,7	kWh/t	Doka	842.64	t	6	GJ	C3.1	Tableau 40	1	2	2	2	2		
Convoyeur (électrique)	E.	2,2	kWh/t	Doka	842.64	t	3	GJ	C3.2	Tableau 40	1	2	2	2	2		
Chargeur (diesel)	E.	3,7	MJ/t	Doka	842.64	t	2	GJ	C3.3	Tableau 40	1	2	2	2	2		
ÉTAPE DE FIN DE VIE (TRANSPORT)																	
Transport (acier)	T.	23 354	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C2.1	Tableau 40	2	1	1	1	2		
Transport (bois)	T.	0	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C2.2	Tableau 40	2	1	2	1	2		
Transport (béton)	T.	211 328	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C2.3	Tableau 40	2	1	2	1	2		
Transport (en vrac)	T.	52 507	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C2.4	Tableau 40	2	1	2	1	2		
Transport (résidus)	T.	12 077	tkm	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C3.1	Tableau 40	2	1	2	1	2		
Résidus	R.	101	tonne	FPI	S/o	S/o	S/o	S/o	C4	Tableau 40	2	1	2	1	2		

G.E: Gordon Engineering; AT: Athena; Gabor Doka: Auteur du rapport Ecoivent Partie V

Tableau 40. Analyse de la qualité des données secondaires (C1-C3)

Étape de transport A4 à l'étape d'utilisation d'énergie B6											
Étapes de cycle vie du bâtiment	Type : Énergie / Transport	Processus modélisés	Base de données	Localisation géographique	Année	Qualité de la donnée					Note
						Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	
ÉTAPE DE FIN DE VIE											
C1.1	E.	Diesel, burned in building machine (GLO) processing Alloc Def, U	Ecoinvent v3.3	Mondial	2016	3	1	4	2	2	
C3.1	E.	Electricity, high voltage (CA-QC) production mix Alloc Def, U	Ecoinvent v3.3	Québec, CA	2016	1	1	1	2	2	
C3.2	E.	Electricity, high voltage (CA-QC) production mix Alloc Def, U	Ecoinvent v3.3	Québec, CA	2016	1	1	1	2	2	
C3.3	E.	Diesel, burned machine (GLO) processing Alloc Def, U	Ecoinvent v3.3	Mondial	2016	3	1	4	2	2	
C2.1	T.	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent v3.3	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
C2.2	T.	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent v3.3	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
C2.3	T.	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent v3.3	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
C2.4	T.	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent v3.3	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
C3.1	T.	Transport, freight, lorry, unspecified (RoW)	Ecoinvent v3.3	Mondial	2015	1	1	4	2	2	
C4	R.	Landfill of municipal solid waste, EU-27	ELCD	Europe	2016	2	1	3	2	2	

3. ANALYSE D'IMPACTS ET RÉSULTATS

Les impacts ont été modélisés à l'aide de TRACI 2.1, un outil d'évaluation d'impacts adapté au contexte nord-américain. Bien que TRACI présente un si grand nombre d'indicateurs, les interprétations de cette étude mettront l'accent sur les indicateurs recommandés par la règle de catégorie de produit pour l'industrie forestière (de l'anglais « *Product category rules (PCR)*») [55]. De plus, puisque le programme de développement de connaissance 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 construite autour des indicateurs tels que le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources fossiles. Une attention particulière sera portée aux émissions GES. En prenant en considération les écarts minimaux présentés au Tableau 30, les différences relatives d'au moins 10 % seront jugées significatives pour les indicateurs de réchauffement climatique et l'épuisement des ressources fossiles, et pour l'indicateur appauvrissement de la couche d'ozone, elles seront jugées significatives pour au moins 50 %.

Les résultats des quatre scénarios de bâtiment (scénario de base et trois autres scénarios alternatifs) sont présentés selon les objectifs de l'étude. L'analyse d'impact permet d'effectuer non seulement une analyse comparative d'un scénario donné par rapport à un autre selon les objectifs de l'étude initialement définis, mais elle permet aussi de faire une analyse de la contribution des étapes de cycle de vie (production, transport, utilisation, fin de vie) et bien d'autres processus. Par conséquent, la présentation des résultats est divisée en deux sections. La première section analyse les impacts selon les quatre objectifs principaux associés à chaque scénario (voir Figure 3). La deuxième section pousse un peu plus loin l'analyse des impacts en analysant, aussi bien la contribution aux impacts des différentes étapes de cycle de vie que la contribution des différents systèmes actifs constitutifs des scénarios analysés, pour répondre aux objectifs généraux de l'étude (voir section 2.1.1).

3.1 Analyse d'impacts selon les objectifs de chaque scénario

3.1.1 Résultats du bâtiment net-zéro tel que construit

Cette section traite des résultats du bâtiment net-zéro tel que construit. Les résultats sont analysés en faisant la comparaison des impacts de la production des matériaux ayant servi à la construction du bâtiment selon les performances normatives de net-zéro avec les impacts de l'énergie produite et utilisée durant l'étape d'opération du bâtiment (aussi appelée étape d'utilisation du bâtiment). La Figure 9 montre que la contribution des émissions de GES associées à la production des matériaux (utilisés durant la construction, la réparation et le remplacement) dans un bâtiment de type net-zéro représente 70 % des émissions du bâtiment sur 60 ans de services, la fin de vie n'étant pas prise en compte. Les émissions associées à production et de la consommation d'énergie sur site représentent 30 % des émissions globales. Par contre, la prise en compte de la fin de vie qui représente 11 % des impacts globaux du bâtiment, donne une distribution 61 % pour les matériaux et 28 % pour l'énergie d'opération.

Dans le contexte de la province du Québec où l'hydroélectricité est une énergie renouvelable à très faible empreinte carbone, et où les 21 % de l'énergie d'opération utilisée par le bâtiment sont fournis par l'Hydro-Québec et le reste (79 %) par les dispositifs net-zéro, les impacts associés aux matériaux sont les plus importants contributeurs aux impacts globaux du bâtiment net-zéro. Ce résultat sur la part des matériaux est relatif aux exclusions faites dans la section 2.2.5 et résumées dans le Tableau 3. Il est aussi relatif aux spécifications faites

dans la section 2.3.6. En effet, pour éviter le double-comptage, il a été clairement expliqué que tous les matériaux et composants des systèmes actifs font partie des infrastructures de production énergétique, et de fait, ne sont pas inventoriés comme matériaux constitutifs du bâtiment. Ce résultat est proche des résultats de l'étude menée en Italie par Fusco et al. [56], laquelle exclut aussi la comptabilisation des systèmes de production des énergies renouvelables dans l'étape de production des matériaux, mais prend en compte les cloisons intérieures et les escaliers. Fusco et al., ont montré que les émissions de GES associées aux matériaux représentent 65 % des impacts totaux du cycle de vie du bâtiment, alors les émissions associées à l'énergie d'opération représentent 35 % sur une durée de vie du bâtiment estimée à 50 ans [56]. Par contre, l'étude menée par Paleari et al., laquelle exclut les matériaux servant à la réparation et au remplacement durant l'étape d'utilisation, crédite les matériaux de 56 % des impacts totaux du cycle de vie du bâtiment sur 100 ans, contre 44 % pour l'énergie d'opération [5]. Autrement dit, la distribution des impacts présentée dans la littérature varie d'une étude à l'autre, et ce, en fonction des inclusions ou exclusions appliquées à l'étude.

Par contre, d'autres études portant sur les bâtiments à haute efficacité énergétique se focalisent dans la comparaison de l'énergie d'opération à l'énergie primaire intrinsèquement liée à la production et au transport des matériaux [57-62]. Toutes ces études, bien que ne s'attardant que sur les aspects du cycle de vie énergétique du bâtiment, concluent que l'énergie intrinsèque associée à la production des matériaux atteint des proportions variant entre 57 % et 77 % contre 43 % et 23 % pour l'énergie d'opération. En d'autres mots, que ce soit la comparaison des émissions intrinsèques ou la comparaison de l'énergie primaire intrinsèque avec celles de l'étape d'opération, il ressort de cela que l'étape de production et l'étape de transport des matériaux dominent largement sur l'étape d'opération.

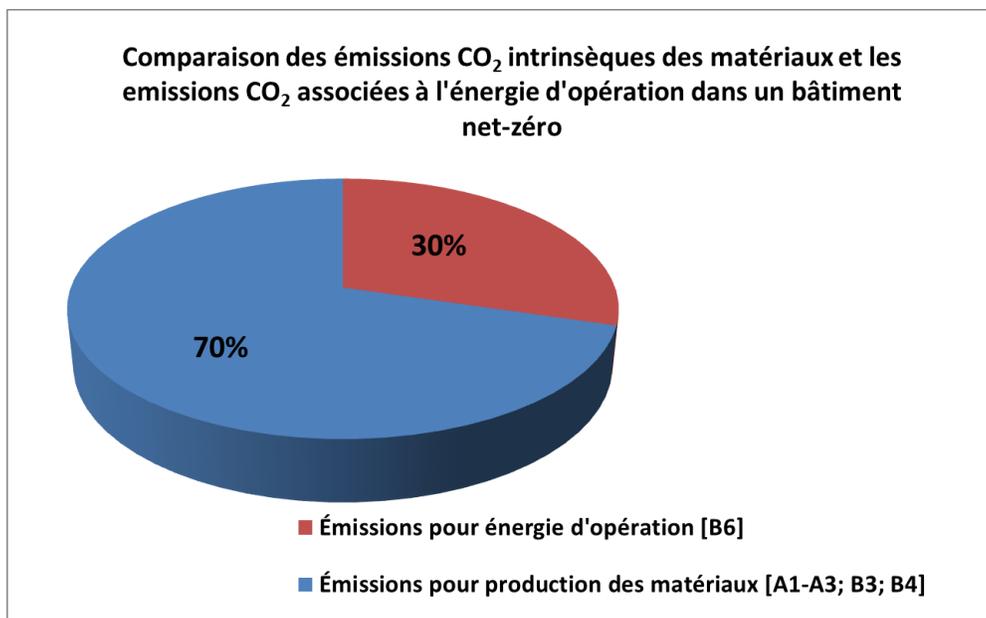


Figure 9. Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération

Outre les émissions de GES, la Figure 10 montre que les impacts associés à la production des matériaux sont plus élevés que les impacts associés à l'énergie d'opération dans huit catégories d'impacts sur les neuf restants, incluant la formation de smog photochimique, l'acidification, l'eutrophisation, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes, les effets respiratoires, l'écotoxicité, et l'épuisement des ressources fossiles. Il apparaît que la

différence des impacts analysés varie entre les valeurs extrêmes de 59 % pour l'indicateur smog photochimique à 81 % pour l'indicateur effets cancérigènes. Les impacts associés à l'énergie d'opération ne sont plus élevés que dans une seule catégorie d'impacts, à savoir l'appauvrissement de la couche d'ozone, dont la différence comparée des impacts est de 2 %. C'est une différence négligeable compte tenu des incertitudes présentées dans Tableau 30.

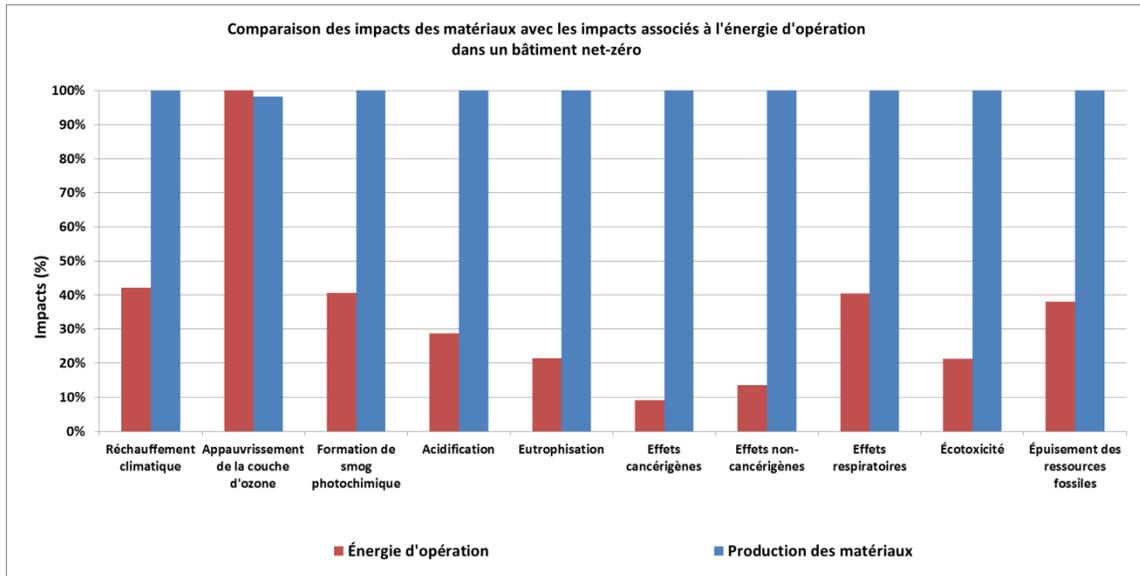


Figure 10. Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération

3.1.2 Résultats du bâtiment conventionnel

Cette section traite des résultats associés au scénario conventionnel. Les résultats sont analysés en faisant la comparaison des impacts attribuables à la production des matériaux (incluant les matériaux de réparation et de remplacement) ayant servi à la construction du bâtiment selon les performances normatives de net-zéro avec les impacts attribuables à la production des matériaux ayant servi la construction du bâtiment conventionnel.

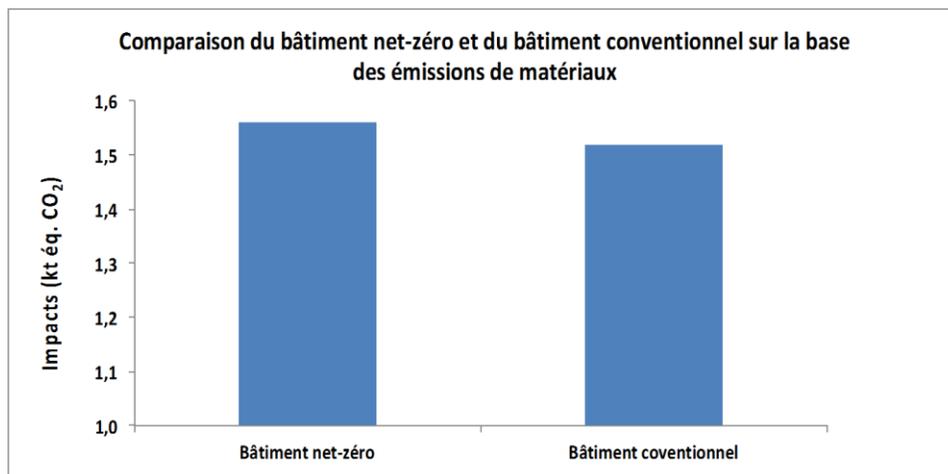


Figure 11. Émissions intrinsèques des matériaux comparées aux émissions attribuables à l'énergie d'opération

La Figure 11 et Figure 12 montrent que les émissions attribuables à la production des matériaux sont 3 % plus élevées dans le cas du bâtiment net-zéro que dans le cas du bâtiment conventionnel. En valeurs absolues, la Figure 11 montre que la différence des émissions est d'environ 41 t éq. CO₂. En ce qui concerne les autres indicateurs, la Figure 12 montre que les impacts des matériaux dans le bâtiment net-zéro sont plus élevés que les impacts des matériaux dans le bâtiment conventionnel dans les neuf catégories d'impacts. C'est une différence d'impacts non significative en tenant des incertitudes associées aux modèles et aux données (Tableau 30)

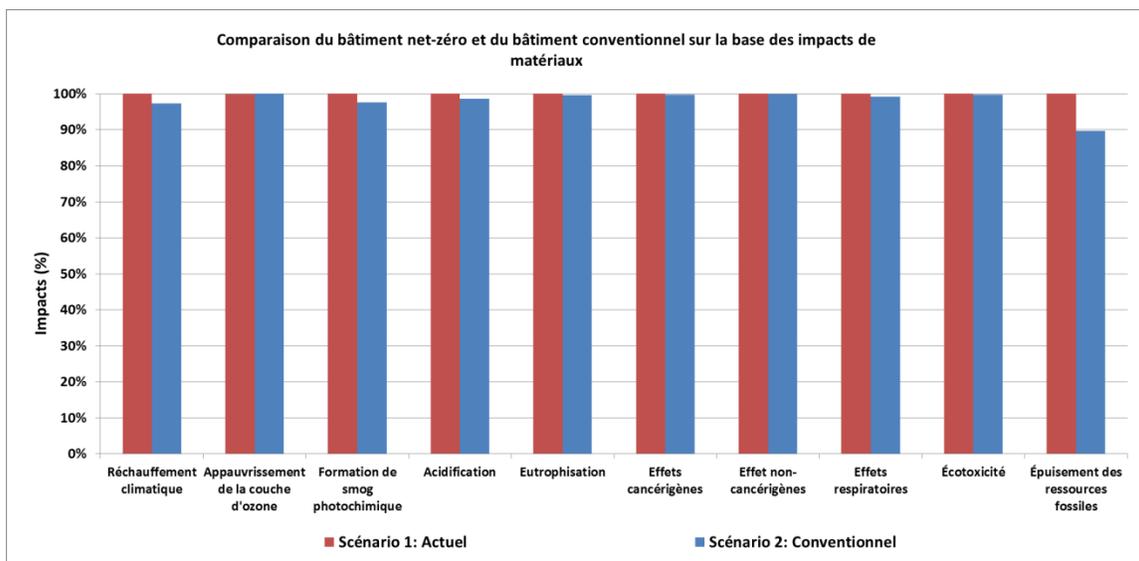


Figure 12. Illustration des impacts de matériaux dans la comparaison des deux bâtiments

3.1.1. Résultats du bâtiment ayant une structure en bois

Cette section compare les impacts du bâtiment de base net-zéro (béton-acier) avec les impacts du bâtiment équivalent ayant une structure en bois.

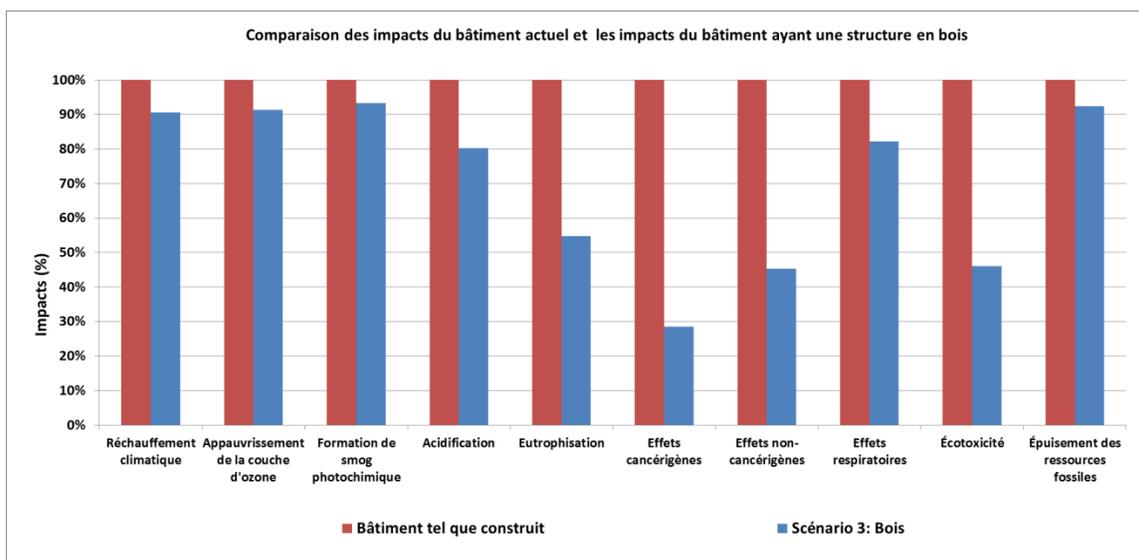


Figure 13. Illustration comparative des impacts totaux du bâtiment actuel et ceux du bâtiment en bois

La Figure 13 montre que l'utilisation d'une structure bois en remplacement de l'acier entraîne une diminution des émissions du bâtiment en bois de l'ordre de 9,5 %. C'est une réduction non significative, compte tenu du seuil d'incertitudes fixé à 10% au Tableau 30 . En ce qui concerne les autres indicateurs, la Figure 13 montre que le bâtiment net-zéro en bois présente une meilleure performance environnementale que le bâtiment net-zéro en béton-acier, et ce, dans les neuf catégories d'impacts restants. La plus haute performance du bâtiment en bois est observée au niveau de la catégorie effets cancérigènes, où le bâtiment en bois affiche une réduction d'impacts de 72 %. La plus basse performance est illustrée par la catégorie smog photochimique, où le bâtiment en bois affiche une réduction d'impacts de seulement 7 %. Quant à l'indicateur épuisement des ressources fossiles, une réduction d'impacts de 8 % est observée. C'est une réduction négligeable, car inférieure à 10 %, selon le Tableau 30.

3.1.3 Résultats associés au bâtiment bois Plus (bois+)

Dans cette section, les impacts du bâtiment net-zéro tel que construit (béton-acier) sont comparés avec les impacts de son équivalent doté d'une quantité accrue en bois et de technologies alternatives opérant à un régime optimal.

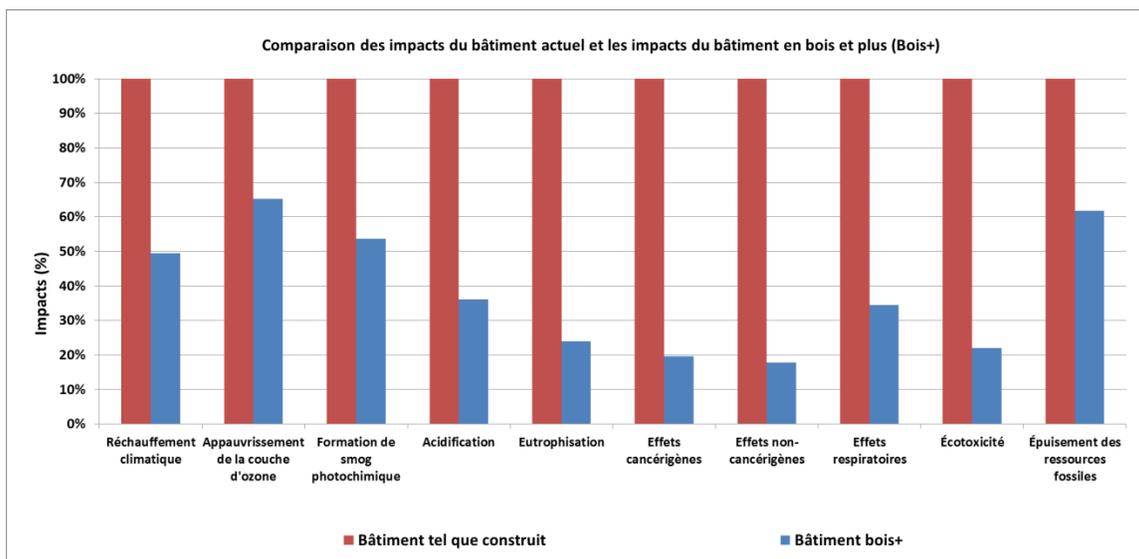


Figure 14. Illustration comparative des impacts totaux du bâtiment actuel et ceux du bâtiment en bois et plus (bois+)

La Figure 14 montre que l'utilisation accrue du bois au niveau de la structure et de l'enveloppe entraîne une diminution significative des émissions du bâtiment en bois (bois+) de l'ordre de 51 %. L'explication de cette importante réduction est en partie liée aux remplacements de l'acier structural, des revêtements en aluminium et de l'isolant giclé par le bois structural respectivement par les revêtements en bois et l'isolant en panneau de fibre de bois (cette réduction est mieux expliquée avec l'aide de la Figure 19 et de la Figure 20). En ce qui concerne les autres catégories d'impacts, la Figure 14 montre que le scénario bois+ présente une meilleure performance environnementale que le bâtiment net-zéro en béton-acier, et ce, dans les neuf catégories d'impacts. La plus haute performance est observée au niveau de la catégorie effets cancérigènes, où le bâtiment bois+ affiche une réduction d'impacts de 80 %. La plus basse performance est illustrée par l'épuisement des ressources fossiles, où le bâtiment en bois+ affiche une réduction d'impacts de 38 %. La réduction d'impact est

significative pour l'indicateur épuisement des ressources fossiles, mais non significative pour l'appauvrissement de la couche d'ozone crédité de 35% de réduction.

3.2 Analyse approfondie des résultats selon les objectifs généraux

L'analyse de contribution est réalisée pour identifier les étapes ou processus qui contribuent le plus aux impacts totaux des scénarios. Cette analyse est essentielle pour mieux comprendre l'implication des données d'inventaire et d'identifier les étapes de cycle de vie qui offrent des opportunités d'amélioration des scénarios analysés.

3.2.1 Analyse d'impacts du bâtiment net-zéro tel que construit

3.2.1.1 Analyse de la consommation énergétique à l'étape d'opération

Pour mieux comprendre l'analyse de contribution associée à l'étape d'utilisation du bâtiment, il est essentiel d'analyser et de comparer les impacts des deux sources d'approvisionnement en électricité consommée par le bâtiment net-zéro. En effet, le système photovoltaïque ne couvre que 79 % de la demande énergétique. Le reste de la demande est comblée par l'électricité du Québec principalement dominée par l'hydroélectricité. La Figure 15 présente les émissions associées à la production d'un kilowattheure par les deux sources. La figure montre que les émissions associées à l'électricité du Québec sont quatre fois plus faibles que les émissions du système photovoltaïque. La supériorité des impacts du système photovoltaïque est aussi vraie pour les autres indicateurs présentés à la Figure 16. La performance environnementale de l'électricité du Québec est meilleure que celle du système photovoltaïque, et ce, sur toutes les catégories d'impacts considérées. Cela est dû au fait que le système photovoltaïque est une infrastructure dont l'impact est pris en compte dans la production de son électricité. Ainsi, pour chaque kilowattheure produit sur site, les impacts d'une portion de l'infrastructure y sont imputés. Il est tout aussi vrai que la même imputation est faite avec chaque kilowattheure produit par Hydro-Québec, mais les effets de l'infrastructure sont dilués par sa grande capacité de production annuelle de l'Hydro-Québec et l'amortissement de son infrastructure qui est étalé sur une très longue période.

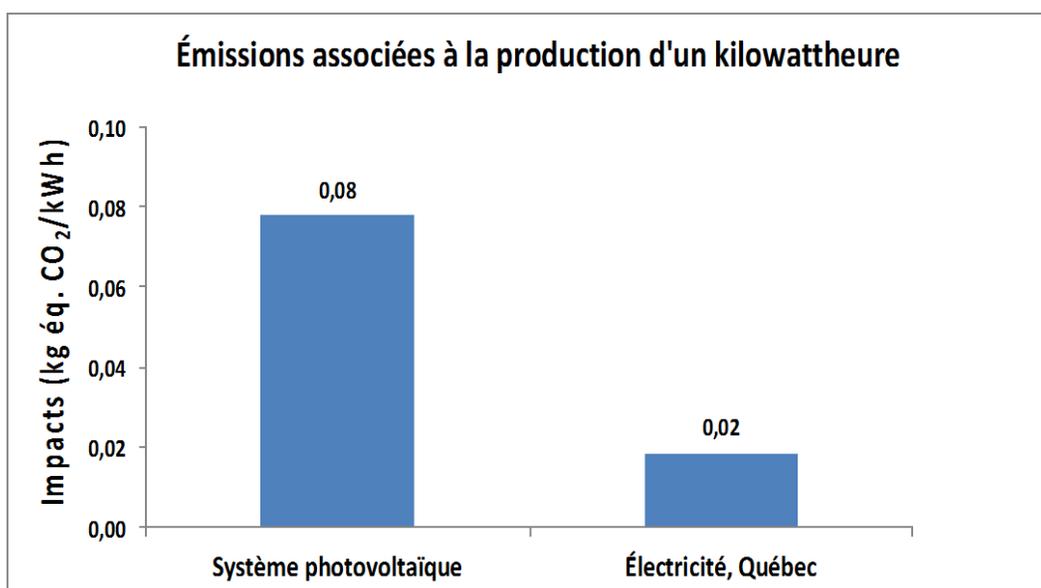


Figure 15. Illustration des émissions associées à la production d'électricité alimentant le bâtiment

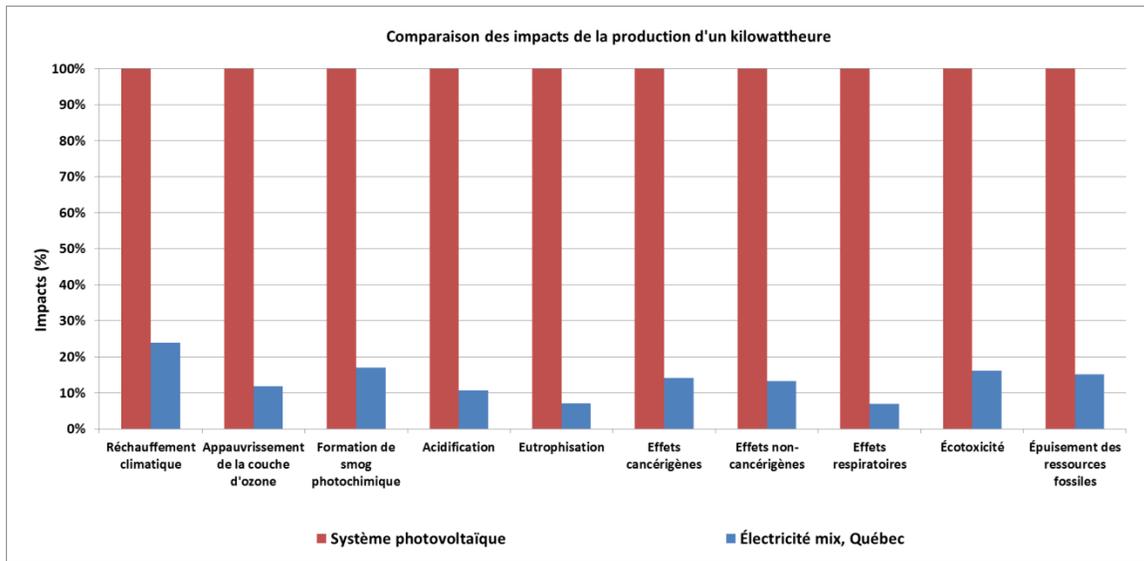


Figure 16. Comparaison des impacts de deux procédés de production d'électricité

La faible empreinte environnementale de l'électricité du Québec rend particulier le contexte de la province comparativement à quelques autres provinces du Canada. En effet, la substitution de l'électricité du Québec alimentant un bâtiment quelconque par celle produite par les dispositifs du net-zéro n'induit pas systématiquement une réduction des impacts du bâtiment. C'est d'ailleurs le cas illustré à la Figure 17, où les impacts de l'étape d'opération du bâtiment conventionnel (alimenté uniquement avec l'Hydro-Québec) sont plus faibles, dans toutes les catégories d'impacts, que les impacts des scénarios alternatifs équipés des technologies net-zéro. Vue sous cet angle, la réduction des impacts engendrés par l'entremise des dispositifs net-zéro n'est possible que grâce à une combinaison judicieuse des mesures passives et actives.

La Figure 17 montre aussi que l'optimisation des systèmes actifs améliore non seulement les performances énergétiques, mais elle améliore aussi les performances environnementales des procédés. Au niveau des émissions de GES, une réduction de 51 % d'émissions est observée par rapport au scénario bois (non optimisé). Cette réduction est la conséquence directe des effets d'optimisation des procédés. En effets, d'un point de vue d'impacts environnementaux, les procédés (systèmes) sont demeurés pratiquement invariants au niveau de leurs infrastructures respectives (même quantité de matériaux, même quantité de composants). Par ailleurs, il a été démontré dans la section inventaire des systèmes actifs (section 2.3.6) que pour chaque kilowattheure ou mégajoule produit, une portion des impacts de l'infrastructure y est imputée. Ainsi, l'amélioration du rendement global d'un procédé (infrastructure quasi inchangée) se traduit inéluctablement par une diminution des impacts de la portion de l'infrastructure par unité de production (kWh ou MJ).

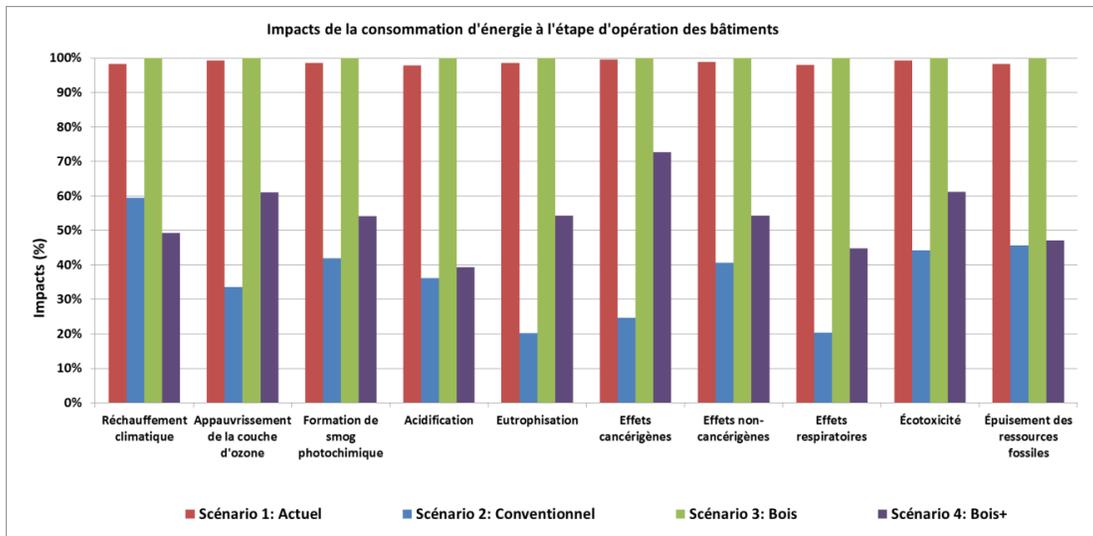


Figure 17. Comparaison des impacts de l'énergie utilisée à l'étape d'opération des bâtiments

3.2.1.2 Analyse de contribution aux impacts du bâtiment net-zéro tel que construit

Le tableau ci-dessous (Tableau 41) présente les résultats de l'analyse de contribution du bâtiment net-zéro tel que construit. Les résultats montrent que l'étape de production est celle qui contribue le plus aux impacts du cycle de vie du bâtiment dans sept catégories d'impacts sur dix, l'acidification (52 %), l'eutrophisation (68 %), les effets cancérigènes (88), les effets non cancérigènes (76 %), les effets respiratoires (47 %), l'écotoxicité (73 %), et l'épuisement des ressources fossiles (41 %). L'étape d'opération se classe en deuxième position au niveau de la contribution aux impacts du bâtiment. En effet, cette étape domine dans 3 catégories d'impacts sur les dix considérées, incluant le réchauffement climatique (46 %), l'appauvrissement de la couche d'ozone (54 %), la formation de smog photochimique (44 %). La contribution élevée de l'étape d'opération est due essentiellement aux impacts occasionnés par la consommation d'électricité produite sur site. La contribution moyenne de l'énergie consommée aux impacts de cette étape représente 63 % des impacts de l'étape, toutes catégories d'impacts confondues. Les impacts de l'étape de fin de vie et ceux de l'étape de transport sont respectivement troisième et quatrième contributrices aux impacts du cycle de vie du bâtiment.

Tableau 41. Analyse de contribution du bâtiment net-zéro tel que construit

Catégorie d'impact	Production	Transport (A4)	Opération* (Énergie)	Opération* (Réparation)	Opération* (remplacement)	Fin de vie	Total
Réchauffement climatique	39%	4%	28%	1%	16%	11%	100 %
Appauvrissement de la couche d'ozone	26%	9%	45%	1%	8%	10%	100 %
Formation de smog photochimique	42%	2%	26%	1%	18%	12%	100 %
Acidification	52%	2%	21%	1%	19%	5%	100 %
Eutrophisation	68%	1%	18%	1%	13%	1%	100 %
Effets cancérigènes	88%	0%	8%	0%	4%	0%	100 %
Effets non cancérigènes	76%	1%	12%	0%	11%	0%	100 %
Effets respiratoires	47%	2%	28%	2%	19%	4%	100 %
Écotoxicité	73%	0%	17%	0%	9%	0%	100 %
Épuisement des ressources fossiles	41%	11%	24%	1%	11%	12%	100 %

* L'étape d'opération est représentée par les cellules colorées au sein de chaque catégorie d'impact, car l'étape d'opération n'inclut pas seulement l'énergie utilisée, mais aussi les matériaux de réparation et les matériaux de remplacement.

3.2.2 Analyse d'impacts du bâtiment conventionnel

Le Tableau 42 présente les résultats de l'analyse de contribution de tous les scénarios analysés. Dans le cas du bâtiment conventionnel, les résultats montrent que l'étape de production des matériaux est celle qui contribue le plus aux impacts du cycle de vie du bâtiment dans tous les dix indicateurs de performances considérés. Cela inclut le réchauffement climatique (44 %), l'appauvrissement de la couche d'ozone (37 %), la formation de smog photochimique (48 %), l'acidification (60 %), l'eutrophisation (79 %), les effets cancérigènes (94 %), les effets non cancérigènes (82 %), les effets respiratoires (60 %), l'écotoxicité (81 %) et l'épuisement des ressources fossiles (43 %). L'étape d'opération est la seconde contributrice aux impacts totaux du cycle de vie du bâtiment dans les dix catégories d'impacts dominées par l'étape de production. Le parallèle avec le bâtiment tel que construit montre que l'énergie utilisée (essentiellement produite par Hydro-Québec) ne semble plus être la plus importante contributrice de l'étape d'opération. En effet, c'est plutôt l'étape de remplacement des matériaux qui domine au sein de cette étape de cycle de vie. La contribution moyenne des matériaux consommés aux impacts de cette étape représente 58 % des impacts, toutes catégories d'impacts confondues. Les étapes de fin de vie et de transport sont respectivement les troisième et quatrième contributrices aux impacts du cycle de vie du bâtiment conventionnel.

Tableau 42 Analyse de contribution du bâtiment conventionnel

Catégorie d'impact	Production	Transport (A4)	Opération* (Énergie)	Opération* (Réparation)	Opération* (remplacement)	Fin de vie	Total
Réchauffement climatique	44%	5%	20%	1%	19%	11%	100 %
Appauvrissement de la couche d'ozone	37%	13%	22%	2%	11%	14%	100 %
Formation de smog photochimique	48%	3%	13%	1%	21%	14%	100 %
Acidification	60%	2%	9%	1%	22%	6%	100 %
Eutrophisation	79%	1%	4%	1%	15%	1%	100 %
Effets cancérigènes	94%	0%	2%	0%	4%	0%	100 %
Effets non cancérigènes	82%	1%	5%	0%	11%	0%	100 %
Effets respiratoires	60%	2%	8%	2%	24%	4%	100 %
Écotoxicité	81%	1%	9%	0%	10%	0%	100 %
Épuisement des ressources fossiles	43%	13%	14%	2%	14%	14%	100 %

*L'étape d'opération est représentée par les cellules colorées au sein de chaque catégorie d'impact, car l'étape d'opération n'inclut pas seulement l'énergie utilisée, mais aussi les matériaux de réparation et les matériaux de remplacement.

3.2.3 Analyse d'impacts du bâtiment à structure en bois

Dans le cas du bâtiment à structure en bois, les résultats de contribution aux impacts suivent presque la même tendance que dans le cas de base (voir Figure 18). En effet, les résultats montrent que les impacts de l'étape de production sont, toutes catégories d'impacts prises en compte, les plus importants contributeurs aux impacts du cycle de vie du bâtiment. L'étape d'opération est la seconde contributrice aux impacts totaux du cycle de vie du bâtiment. Les étapes de fin de vie et de transport sont respectivement les troisième et quatrième contributrices aux impacts du cycle de vie du bâtiment.

3.2.4 Analyse d'impacts scénarios bois⁺

Dans le cadre du scénario bois⁺, les résultats de contribution aux impacts suivent aussi la même tendance que dans les autres scénarios net-zéro. En effet, les résultats montrent que les impacts de l'étape de production sont, toutes catégories d'impacts prises en compte, les plus importants contributeurs aux impacts du cycle de vie du bâtiment. L'étape d'opération est la seconde contributrice aux impacts totaux du cycle de vie du bâtiment. Les étapes de fin de vie et de transport sont respectivement les troisième et quatrième contributrices aux impacts du cycle de vie du bâtiment.

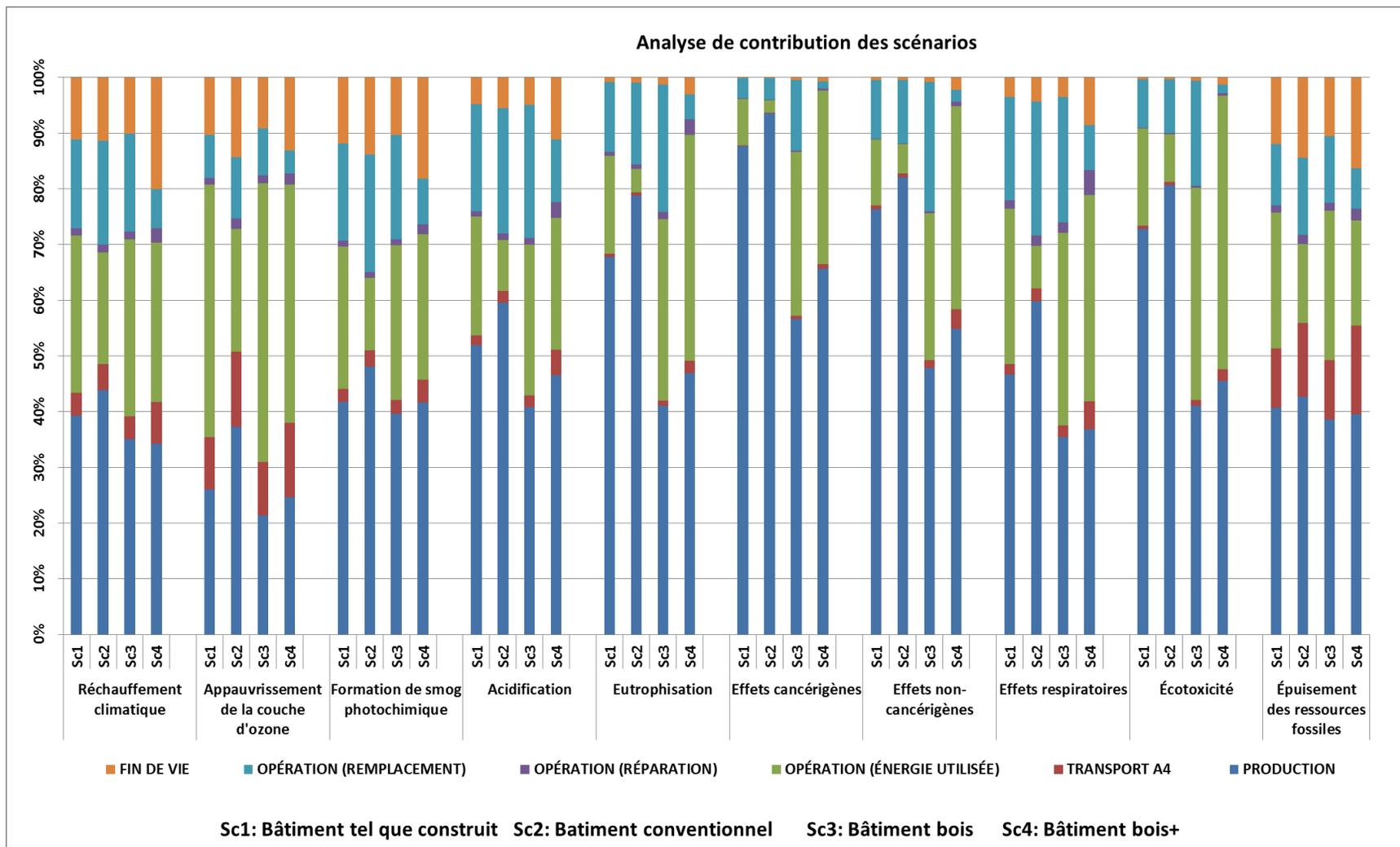


Figure 18. Analyse de contribution des scénarios

3.2.5 Analyse de contribution de l'étape de production des matériaux dans le bâtiment tel que construit

La figure ci-dessous (Figure 19) présente l'analyse de contribution des différents matériaux aux impacts totaux de l'étape de production des matériaux (A1-A3). La figure montre que l'impact de l'acier (incluant de l'acier structural et acier pour montants métalliques) est le plus important contributeur, et ce, dans neuf catégories d'impacts sur dix incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone (46 %), la formation de smog photochimique (33 %), l'acidification (48 %), l'eutrophisation (76 %), les effets cancérigènes (91 %), l'effet non cancérigène (81 %), les effets respiratoires (50 %), l'écotoxicité (83 %) et finalement l'épuisement des ressources fossiles (30 %). L'impact de l'aluminium est le second contributeur au sein des neuf indicateurs dominés par l'acier. Toutefois, l'impact de l'aluminium est le plus grand contributeur au sein de l'indicateur réchauffement climatique, où celui-ci est crédité d'une contribution de 32 % d'émissions GES alors que l'acier n'est crédité que de 25 %. Le béton (ciment) est le troisième contributeur aux impacts totaux des matériaux. Par contre, le béton est le deuxième plus grand contributeur au sein de l'indicateur réchauffement climatique, où celui-ci est crédité de 27 % des impacts totaux de l'étape production. Les isolants, bien qu'ayant une faible portion massique comme intrants (mois de 1 %) sont quatrième contributeurs aux impacts totaux (voir Tableau 32). C'est d'ailleurs pour cette raison que le critère seuil d'exclusion sur une base massique n'a pas été fixé dans cette étude.

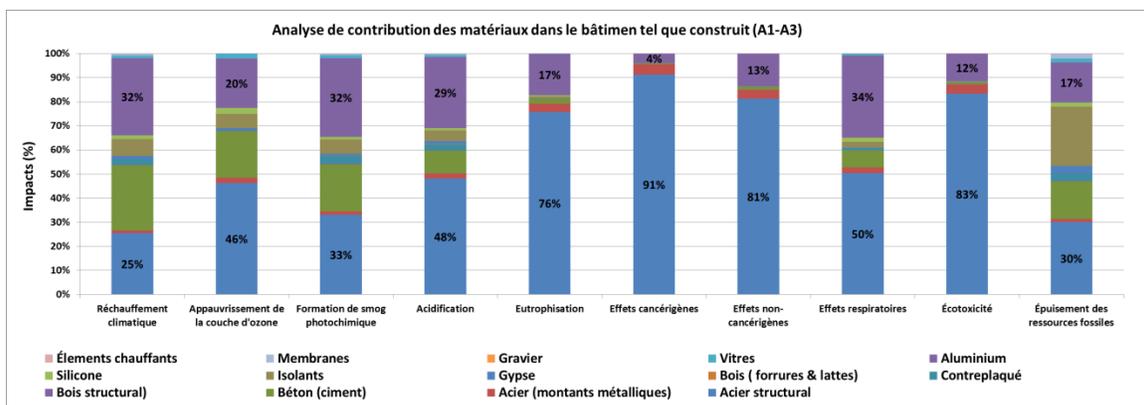


Figure 19. Analyse de contribution de l'étape de production des matériaux (A1-A3)

3.2.6 Analyse d'impacts de la consommation des matériaux (A1-A3, B3 et B4)

La figure ci-dessous (Figure 20) présente les impacts liés à la consommation des matériaux dans chaque scénario de bâtiment analysé. D'un scénario à l'autre, les résultats montrent une amélioration graduelle des performances environnementales, et ce, au fur et à mesure que les modifications telles que l'inclusion du bois structural, le remplacement de certains matériaux (ex. : isolants giclés et revêtement en aluminium) par des matériaux à base du bois, réputés sobres en carbone sont intégrées dans la conception. En mettant l'accent sur l'indicateur des émissions de GES, l'on peut observer que le passage du bâtiment net-zéro tel que construit au bâtiment conventionnel (caractérisé par la réduction de la quantité d'isolants ou encore la réduction globale de la résistance thermique des murs) réduit de 3 % les émissions totales des matériaux. Par contre, l'intégration d'une structure en bois en remplacement de l'acier structural (plus important contributeur aux impacts de production des matériaux) induit une réduction supplémentaire des émissions de GES. Soit une réduction totale de 12 % par rapport au scénario de base (béton-acier). En termes absolus, cela représente une réduction de 182 t éq. CO₂. La considération d'autres matériaux sobres en carbone au niveau de l'enveloppe, par exemple le

remplacement de l'isolant giclé (quatrième contributeur) par l'isolant en panneaux de fibre de bois et le remplacement des revêtements en aluminium (deuxième contributeur) par le revêtement en bois, entraîne une autre réduction supplémentaire des émissions totales de GES associée aux matériaux. Soit une réduction totale de 52 % par rapport au scénario de base (béton-acier). En absolu, cela représente 814 t éq. CO₂ évités, avec seulement un édifice institutionnel, et ce, dès l'année de construction et non pas sur les 60 ans de service.

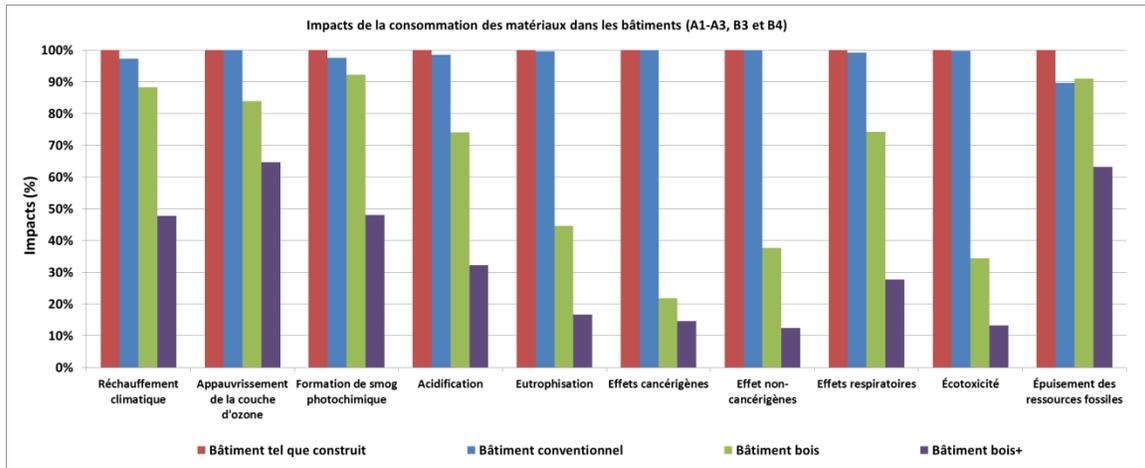


Figure 20 Illustration comparative des impacts liés à la consommation des matériaux (A1-A3, B3 et B4)

3.2.7 Analyse comparative des émissions intrinsèques des matériaux et les émissions de l'énergie d'opération en fonction des scénarios définis

La Figure 21 est composée de trois figures (Figure 21-A, Figure 21-B, et Figure 21-C). Ces figures montrent que la part des émissions associées aux matériaux diminue de 3% entre le scénario de base et le scénario bois ; et de 1 % entre le scénario de base et le scénario bois+. La variation de 3 % est attribuable à l'inclusion de la structure bois puisque les émissions de l'énergie d'opération du scénario bois demeurent relativement égales à celle du scénario de base. Par contre la variation de 1 % entre les distributions du scénario de base et celles du scénario bois+ est due à une réduction simultanée des émissions relatives au niveau des matériaux (52 %), et celles relatives à la production d'énergie par les systèmes optimisés (51%). Les deux réductions simultanées ayant lieu dans deux étapes comparées font en sorte que la distribution finale est presque identique à la distribution initiale (voir Figure 9).

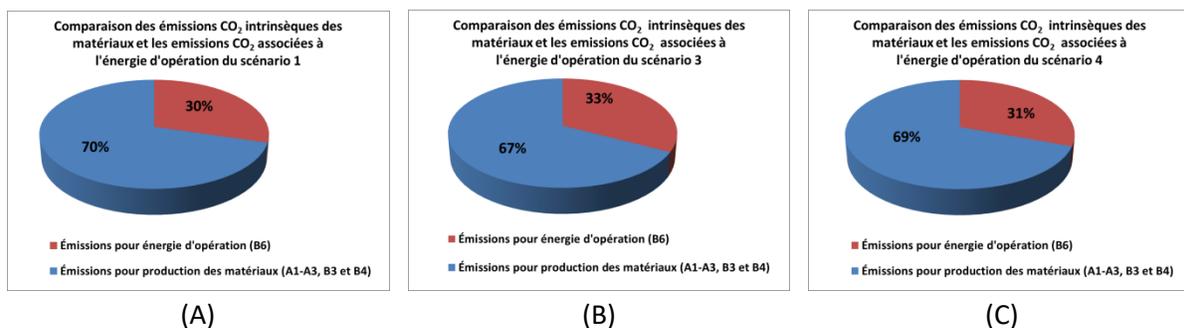


Figure 21. Évolution des distributions des émissions des matériaux et celles de l'étape d'opération

3.2.8 Synthèse et analyse comparative des impacts

La Figure 22 présente les résultats principaux de l'analyse comparative faite dans cette étude de cas. La figure montre que le scénario conventionnel présente une meilleure performance environnementale que le scénario de base net-zéro, et ce, dans toutes les catégories d'impacts considérées. Le bâtiment net-zéro tel que construit présente une performance environnementale moins reluisante comparativement aux deux autres scénarios alternatifs net-zéro (bois et bois+). Par contre, parmi les trois scénarios net-zéro, le scénario bois⁺ est celui qui présente une meilleure performance environnementale. Au niveau des émissions GES, la performance des scénarios bois et bois+ s'améliore respectivement de 9.5 % et 51 %, cela représente respectivement en absolue 220 t éq. CO₂ et 1,17 kt éq. CO₂ évités.

Pour mieux comprendre ces variations de performance entre les scénarios, il est important de recourir à nouveau à la Figure 17 et la Figure 20 déjà présentées plus haut. En effet, les deux figures permettent de faire une analyse comparative des impacts environnementaux issus de l'intégration des matériaux sobres et ceux issus de l'intégration des technologies net-zéro dans le contexte québécois. En effet, l'analyse de la Figure 17 a montré que, comparativement au bâtiment conventionnel consommant uniquement de l'électricité du Québec (essentiellement de l'hydroélectricité), les émissions de l'étape d'opération du scénario net-zéro tel que construit et du scénario bois étaient supérieures à celles du bâtiment conventionnel. Le constat est aussi vrai pour tous les autres indicateurs. La Figure 17 a aussi montré que pour tous les indicateurs sauf le réchauffement climatique, le scénario conventionnel présente une aussi bonne performance environnementale que le scénario bois+. De plus, étant donné que les émissions d'un kilowattheure de l'hydroélectricité sont quatre fois inférieures à celles du système photovoltaïque, l'optimisation des mesures actives et la production d'un surplus d'électricité sur site ont montré une diminution des impacts de l'étape d'opération dans le scénario bois+. L'analyse de la Figure 20, quant à elle, démontre que l'intégration des matériaux en bois présente une opportunité de réduction des émissions plus importante que l'atteinte, en soi, des cibles de haute performance normative et énergétique visées par le net-zéro. C'est en effet, l'intégration combinée des matériaux sobres en carbone et des systèmes optimisés qui culminent à la réduction de GES de 51% dans le scénario bois+.

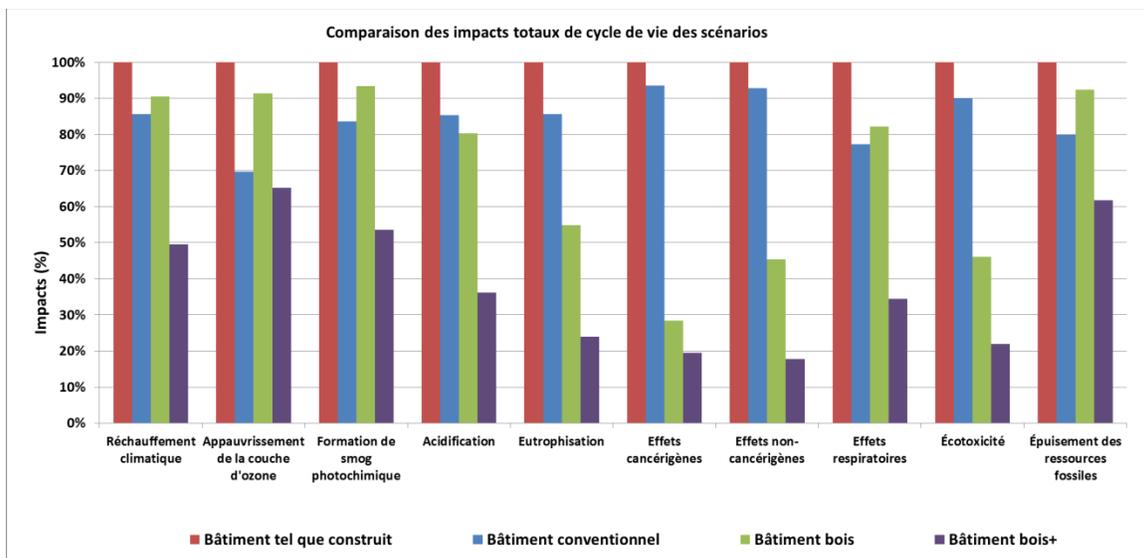


Figure 22. Illustration du potentiel de réduction des impacts par le net-zéro au Québec

3.2.9 Analyse de sensibilité et robustesse des résultats

Dans cette étude, il a été supposé que le bâtiment conventionnel pouvait être alimenté partiellement ou totalement avec de l'hydroélectricité. Tous les résultats présentés plus haut ont été modélisés selon l'hypothèse de l'approvisionnement à 100 % composé d'hydroélectricité. Le Tableau 43 présente l'alimentation en électricité comme paramètre sensible aux impacts du bâtiment conventionnel. Toujours dans le même ordre d'idée, l'analyse de sensibilité présente le contexte énergétique régional comme paramètre sensible aux impacts des bâtiments. Ainsi, il paraît intéressant de contextualiser les résultats obtenus selon le contexte particulier du Québec, avec ceux obtenus dans d'autres contextes tels que l'Ontario et l'Alberta.

Étant donné que cette étude a eu recours à différentes bases de données (la base de données Ecoinvent 3.3, la base de données US LCI, et la base de données ELCD), il est possible que les résultats présentent quelques biais engendrés par le choix des systèmes modélisés. Il est important de souligner que la base de données US LCI a été particulièrement utilisée que pour des produits de bois. Afin de palier à cette utilisation asymétrique de la base de donnée, une analyse de sensibilité permettant de remplacer les processus modélisés avec US LCI avec ceux d'Ecoinvent est nécessaire pour tenter de rendre symétrique les comparaisons relatives. La base de données ELCD par contre a été utilisée de façon symétrique d'un scénario à l'autre.

En poussant un peu plus loin l'analyse, il est possible de démontrer la robustesse des résultats générant de nouveaux résultats avec une autre méthode telle qu'IMPACT 2002+. Le Tableau 43 présente le sommaire des analyses de sensibilité retenues et les justifications associées.

Tableau 43. Paramètres et justifications des analyses de sensibilité

Analyse de sensibilité	Paramètre sensible	Justification
Bibliothèque chauffée au gaz naturel	Réduire la consommation électrique en assurant que 52 % de la demande énergétique est couverte avec du gaz naturel.	Évaluer la sensibilité des émissions du bâtiment conventionnel par rapport à une combinaison de sources énergétiques. Comparer les impacts avec ceux des scénarios net-zéro.
Analyse de l'implantation du net-zéro dans le contexte de l'Ontario	Remplacer l'électricité du Québec par le mix énergétique de l'Ontario	Évaluer la différence d'impacts entre un bâtiment conventionnel et bâtiment net-zéro selon le contexte de l'Ontario.
Analyse de l'implantation du net-zéro dans le contexte de l'Alberta	Remplacer l'électricité du Québec par le mix énergétique de l'Alberta.	Évaluer la différence d'impacts entre un bâtiment conventionnel et bâtiment net-zéro selon le contexte de l'Alberta
Correction de l'usage asymétrique de la base de données US LCI	Remplacer les processus qui ont servi à modéliser les produits de bois dans US LCI avec des processus alternatifs disponibles dans Ecoinvent.	Évaluer la cohérence des résultats par rapport aux bases de données.
Changer la méthode d'évaluation d'impacts de cycle de vie (ÉICV)	Remplacer TRACI 2.1 par IMPACT 2002+ et générer de nouveaux résultats comparatifs.	Évaluer la cohérence des résultats vis-à-vis les méthodes d'ÉICV.

3.2.9.1 Usage du gaz naturel dans le bâtiment conventionnel

Dans cette étude, il a été supposé que le bâtiment conventionnel pouvait être alimenté partiellement ou totalement avec de l'hydroélectricité. Tous les résultats présentés ci-haut ont été modélisés selon l'hypothèse de l'approvisionnement à 100 % avec de l'hydroélectricité pour le bâtiment conventionnel. Bien que cela soit possible au Québec, mais ce cas de figure est moins fréquent dans le contexte institutionnel. D'ailleurs à ce sujet, une étude de revue menée en 2015 par Clermont [63] dressait le portrait des habitudes de consommation

des bâtiments commerciaux et institutionnels au Québec. Les conclusions de l'étude ont montré que contrairement au secteur résidentiel, dont le chauffage est assuré principalement par l'électricité, les combustibles fossiles sont encore fortement utilisés pour le chauffage des bâtiments institutionnels. Les principales sources d'énergie consommées par le secteur institutionnel sont l'électricité, le gaz naturel et le mazout, lesquelles sont utilisées pour l'éclairage, la climatisation et le chauffage des bâtiments. À la lumière de ce constat, une bibliothèque conventionnelle aurait certainement eu recours au gaz naturel ou au mazout pour ses besoins chauffage. Or, le plan d'action (PACC 2013-2020) du gouvernement élaboré en 2012 s'était fixé l'objectif d'éliminer en 2018 l'utilisation du mazout dans le chauffage des bâtiments commerciaux et institutionnels [4]. En tenant compte du PACC, l'analyse de sensibilité autour de l'utilisation du mazout peut être abandonnée.

Cela étant dit, les besoins en chauffage du bâtiment conventionnel à l'étude sont censés être pris en charge par le gaz naturel. La Figure 8 montre que la consommation en chauffage représente 52 % de la demande énergétique du bâtiment conventionnel, soit une consommation annuelle de 185 507 kWh/an.

La Figure 23 présente les résultats de l'analyse de sensibilité. Celle-ci montre que les trois scénarios de bâtiments net-zéro présentent une meilleure performance environnementale que le bâtiment conventionnel dans trois catégories d'impacts incluant le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone et l'épuisement des ressources fossiles. Il apparaît clairement qu'il y a une corrélation étroite entre l'utilisation du gaz naturel, une ressource fossile, et les trois indicateurs. Cela s'explique par le fait que la consommation du gaz naturel augmente non seulement les émissions de GES du bâtiment conventionnel, lesquelles affectent la couche d'ozone, mais elle contribue aussi à l'épuisement des ressources fossiles. En revanche, le scénario net-zéro de base présente une moins bonne performance que le bâtiment conventionnel dans les sept autres catégories d'impact. Pour ce qui est des deux autres scénarios net-zéro (bois et bois+), ils présentent une aussi bonne performance que le scénario conventionnel dans quatre catégories d'impact incluant l'eutrophisation, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes et l'écotoxicité. Par contre, dans les trois autres catégories d'impacts incluant la formation de smog photochimique, l'acidification et les effets respiratoires, le bâtiment conventionnel performe mieux d'un point de vue environnemental que les deux scénarios.

Du point de vue changement climatique, l'implantation du net-zéro en remplacement d'un bâtiment conventionnel opérant à l'électricité et au gaz naturel dans un rapport de 48 %/52 % par un bâtiment net-zéro aurait occasionné une réduction de 28 % des émissions de GES. En absolu, cela représente 894 t éq. CO₂ évités par rapport au bâtiment conventionnel. Au niveau des ressources fossiles, c'est une réduction de 58 %, soit une consommation de 2 685 GJ d'énergie primaire évitée.

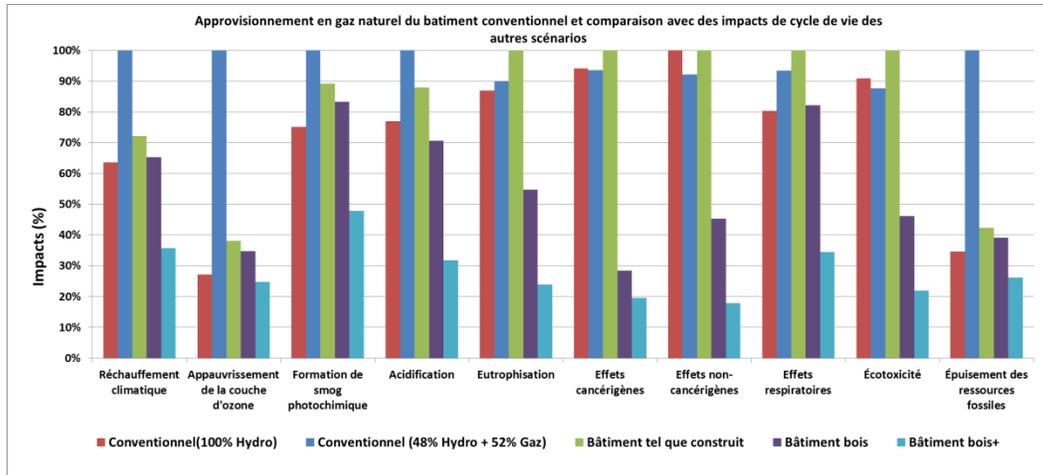


Figure 23. Illustration de la comparaison des scénarios avec le scénario conventionnel alimenté au gaz naturel

3.2.9.2 Analyse de sensibilité autour du mix électrique de l'Alberta et l'Ontario

L'analyse présentée plus haut montre que la réduction des impacts de bâtiments à l'étape d'opération dépend essentiellement de l'électricité substituée par les dispositifs ou technologies net-zéro. Cela dit, il est important de décontextualiser les résultats de cette étude afin de permettre une analyse complète au-delà du contexte québécois et de mettre en contraste les résultats obtenus avec les contextes ontariens et albertains, deux provinces disposant des mix énergétiques assez différents du Québec. La Figure 24 donne une illustration comparative des émissions associées à la production d'un kilowattheure. La figure montre que les émissions du système photovoltaïque sont quatre fois plus élevées que celles de l'électricité mix du Québec, alors qu'elles sont respectivement deux fois et onze fois plus faibles que celles de l'électricité mix d'Ontario et d'Alberta.

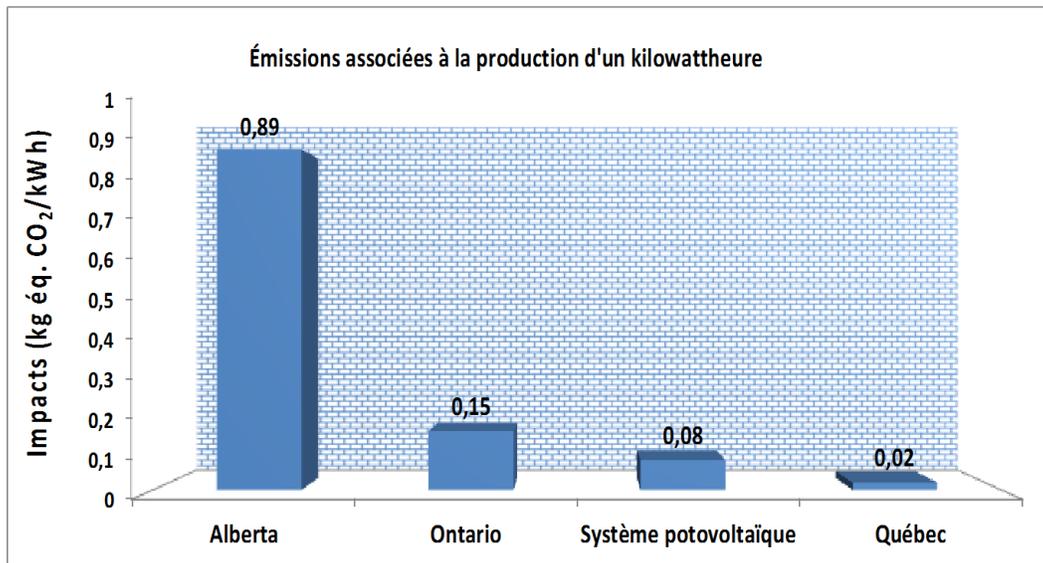


Figure 24. Illustration comparative des émissions associées au kilowattheure produit en Alberta, en Ontario et au Québec

En identifiant l'électricité comme paramètre de sensibilité dans la modélisation des impacts de l'étape d'opération, et en supposant que toutes autres variables du modèle demeurent égales par ailleurs, les deux figures ci-dessous (Figure 25 et Figure 26) montrent une variation significative des résultats selon les contextes

considérés. En effet, la Figure 25 montre que les impacts du bâtiment conventionnel (Ontario) sont plus élevés que les impacts du bâtiment conventionnel (Québec). En d'autres mots, la qualité du mix énergétique influence largement les impacts totaux du cycle de vie d'un bâtiment. Son implantation dans l'un ou l'autre des contextes comparés entraînerait une différence d'impact de l'ordre de 3 kt éq. CO₂.

Aussi, les impacts du bâtiment conventionnel (Ontario) sont plus élevés que les impacts des scénarios bois et bois+, et ce, dans toutes les catégories des impacts. Comparativement au scénario net-zéro de base, le conventionnel (Ontario) est moins performant dans tous les indicateurs sauf dans un seul (effets cancérigènes) où le conventionnel (Ontario) et le net-zéro ont des impacts égaux à 100 %.

Au niveau des émissions de GES, l'on observe une réduction de 52 % de GES entre le conventionnel (Ontario) et le bâtiment net-zéro tel que construit. Cette réduction représenterait en valeur absolue 2,5 kt éq. CO₂ évités. L'intégration de la structure en bois dans le contexte ontarien n'engendre pas une réduction supplémentaire significative des émissions entre le bâtiment actuel et le bâtiment en bois. Par contre, l'optimisation des systèmes actifs et l'intégration des matériaux sobres en carbone au scénario 4 (bois+) entraîne une réduction encore plus importante (76%) entre celui-ci et le scénario conventionnel (Ontario). Cela représente environ 3,7 ktéqCO₂ évités.

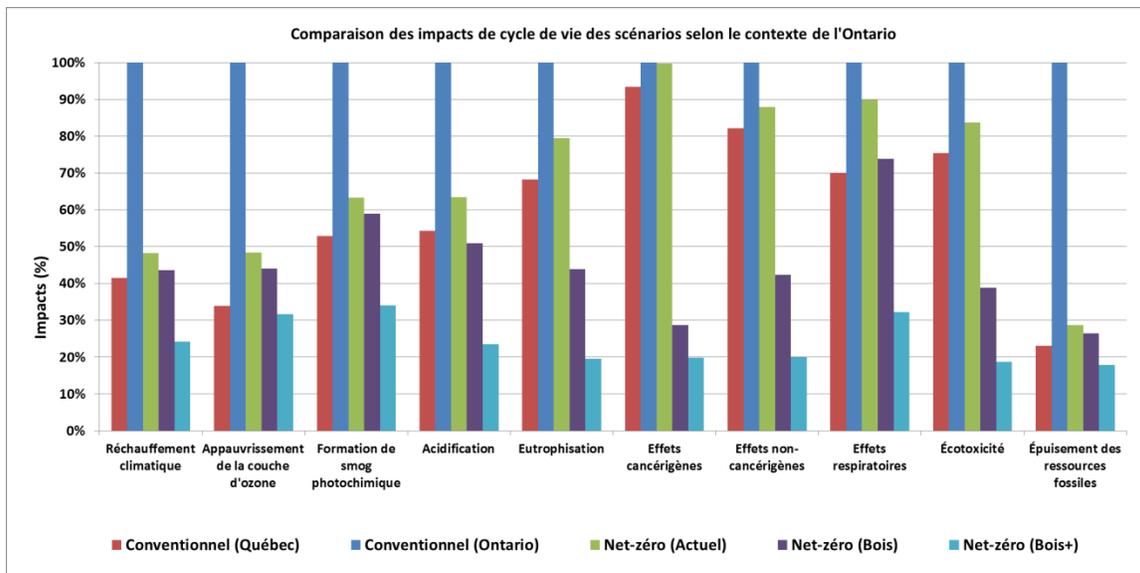


Figure 25. Illustration du potentiel de réduction des impacts avec le net-zéro en Ontario

Quant à la Figure 26, elle montre que les impacts du bâtiment conventionnel sont plus élevés que les impacts de tous les scénarios net-zéro, et ce, dans toutes les catégories des impacts. Au niveau des émissions de GES, l'on observe une réduction de 88 % de GES entre le conventionnel (Alberta) et le bâtiment net-zéro de base (scénario 1). Cela représente en valeur absolue 18 ktéqCO₂ évités. L'intégration des matériaux sobres en carbone entraîne une réduction supplémentaire, soit une réduction totale de 94 % par rapport au bâtiment conventionnel (Alberta). Autrement dit, 19,5 ktéqCO₂ auraient été évités si les scénarios avaient été implantés en Alberta. Aussi pour un bâtiment conventionnel de même caractéristique structurale et architecturale, son implantation en Alberta entraînerait une différence d'impact de l'ordre de 18,6 ktéqCO₂.

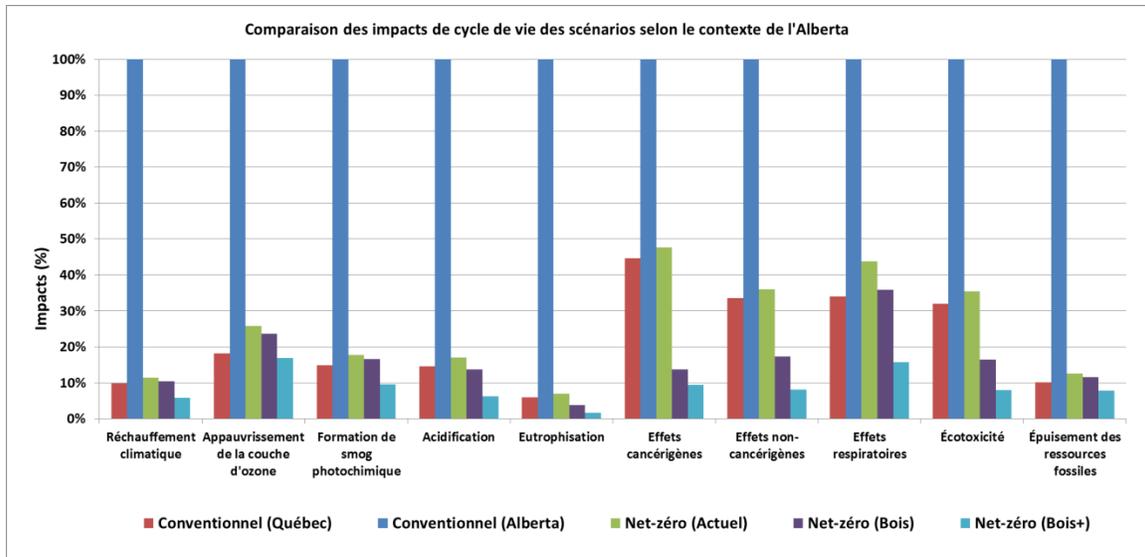


Figure 26. Illustration du potentiel de réduction des impacts avec le net-zéro en Alberta

3.2.9.3 Analyse de sensibilité autour des processus modélisés avec la base de données US LCI

La base de données US LCI a été utilisée pour modéliser l'impact de certains matériaux. Le Tableau 34 présente la liste des matériaux pour lesquels la base de données US LCI a été utilisée. Celle-ci a été utilisée pour les matériaux suivants : le contreplaqué, les fourres en bois, le gypse, l'isolant en panneau de fibre de bois, l'isolant semi-rigide et les lattes. Quant au bois de la structure, c.-à-d. le lamellé-croisé (CLT), il a été modélisé en usant du processus (proxy) de lamellé-collé existant dans Ecoinvent. Celui-ci a été adapté et mis à jour selon les données canadiennes fournies par Athena. Autrement dit, le processus qui modélise les impacts du bois structural ne fait pas l'objet d'une analyse de sensibilité dans ce cas-ci.

Tableau 44. Liste des matériaux ayant été modélisés avec USLCI (extrait du Tableau 34)

Liste des matériaux	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Contreplaqué*	kg	122 828	122 828	122 828	122 828
Fourrures de bois	kg	960	960	960	1008
Gypse*	kg	76749	76749	76749	76749
Isolant en fibre de bois	kg	0	0	0	119 090
Isolant semi-rigide	kg	2894	2894	1670	1670
Lattes*	kg	6088	6088	6088	6088

* Les lignes colorées indiquent les matériaux dont les quantités sont constantes d'un scénario à l'autre.

Le Tableau 44 présente les six matériaux concernés par l'analyse de sensibilité et leur quantité respective. Les lignes de tableau colorées présentent les matériaux dont les quantités sont identiques d'un scénario à l'autre. Par conséquent, la sensibilité autour des processus modélisant ces matériaux est ignorée. Le Tableau 45 présente la variation extrême des quantités entre les scénarios comparés. La variation des quantités entre les scénarios est si faible dans le cas de la fourrure de bois que la sensibilité autour de ces matériaux ne vaut pas la peine d'être examinée. Cela dit, l'analyse de sensibilité ne concerne que deux matériaux finalement (voir Tableau 45).

Tableau 45. Analyse de la variation extrême des paramètres de sensibilité entre scénarios

Liste des matériaux	Valeur minimale (kg)	Valeur maximale (kg)	Variation (%)	Note
Fourrures de bois	960	1008	4%	Très faible variation. La sensibilité autour du modèle US LCI peut être ignorée
Isolant en fibre de bois	0	119 090	100%	Très significative
Isolant semi-rigide	1670	2894	42%	Significative

Le Tableau 46 présente les processus équivalents trouvés dans Ecoinvent pour modéliser les impacts des deux types d'isolants (isolant en fibre de bois et isolant semi-rigide). Le Tableau 47 présente le détail de l'inventaire relatif à la production d'un kilogramme d'isolant en panneau de fibre de bois. Le Tableau 48 présente la modélisation des processus sous une même et unique base de données Ecoinvent.

Tableau 46. Processus de sensibilité identifiés dans Ecoinvent 3.3

Étape de production (A1-A3)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Processus d'isolant en panneau de fibre de bois adapté dans Ecoinvent*	kg	0	0	0	119 090
Polyurethane, rigid foam, RER, production	kg	2894	2894	1670	1670

*voir tableau ci-dessous (Tableau 47). Les données de modélisation de l'isolant en panneau de fibre de bois proviennent de l'étude réalisée par FPIinnovations [54]

Tableau 47. Inventaire pour la production d'1kg d'isolant en panneau de fibre de bois (source FPIinnovations [54])

Intrants	Unité	Production d'1 kg
Matière		
Copeaux de bois	g	989
La résine (MDI)	g	4
Paraffine (Slack Wax)	g	1
Énergie		
Électricité	kWh	0,57
GPL	Litre	4,07 E-04
Essence	Litre	1,31 E-05
Diesel	Litre	1,84 E-03
Gaz naturel	m ³	0,06
Combustible (résidus de bois)	kg	0,11
Autres		
Huile moteur	Litre	5,52 E-05
Graisses	kg	3,94 E-06

Tableau 48. Modélisation de l'isolant en panneau de fibre de bois et choix des processus dans Ecoinvent 3.3

Production d'1 kg d'isolant	Unité	Valeur	Processus	Source/base de données/Justification
Matières premières				
Copeaux de bois	kg	0,989	Wood chips (CA-QC) production, at sawmill	FPIinnovations[54]/Ecoinvent
La résine (MDI)	kg	0,004	Methylenediphenyl diisocyanate (MDI)/EU-27	FPIinnovations[54]/Ecoinvent
Paraffine (Slack Wax)	kg	0,001	Paraffin/RER/production	FPIinnovations[54]/Ecoinvent
Énergie				
Électricité	kWh	0,57	Electricity, medium voltage (CA-QC) electricity voltage transformation	FPIinnovations[54]/Ecoinvent
Total énergie en MJ (GPL/Diesel/Essence)	MJ	0,077	Heat, light fuel oil, 100kW condensing, non-modulating/RER	Athena[64]/FPIinnovations[54]/Ecoinvent LPG: 26 MJ/L; Diesel: 36 MJ/L; Gasoline: 32MJ/L
Gaz naturel	MJ	2,73	Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER	Athena[64]/FPIinnovations[54]/Ecoinvent 45.5 MJ/m3, 0.0008 kg/l
Combustion (résidus de bois)	MJ	1,32	Wood residues, from industry, hardwood, burned in furnace 50kW/RER	Athena[64]/FPIinnovations[54]/Ecoinvent Wood chips: 12 MJ/kg heating value and 50% moisture content
Autres				
Lubrifiant	kg	3,94 E-06	Lubricating oil (CA-QC) production	FPIinnovations[54]/Ecoinvent
Autres huiles (lubrifiants)	Litre	5,52 E-05	Lubricating oil/RER/production	FPIinnovations[54]/Ecoinvent

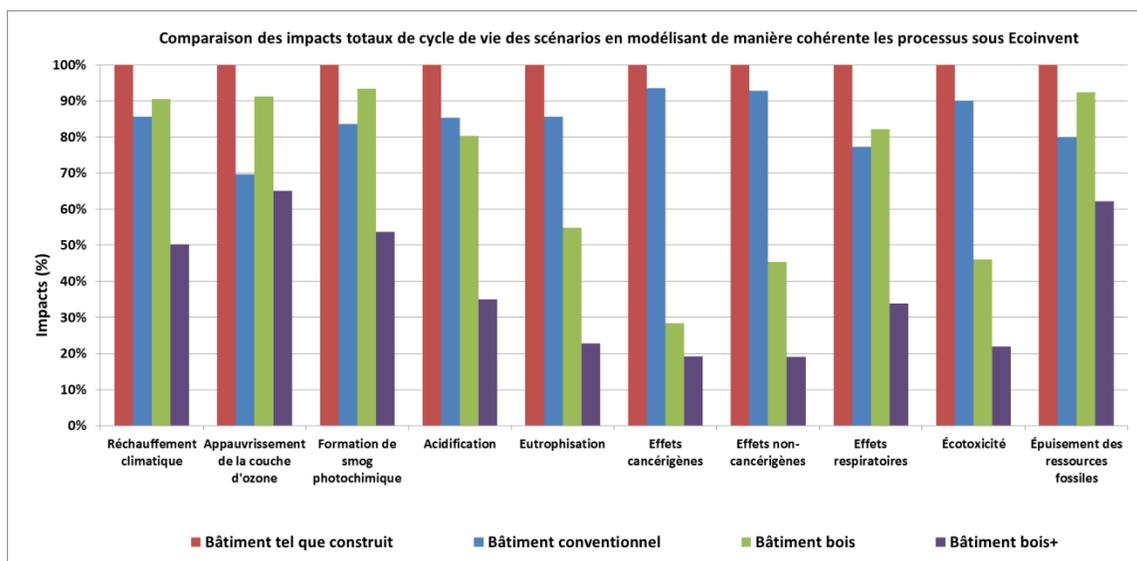


Figure 27. Impacts totaux de cycle de vie des scénarios modélisés de manière cohérente sous une même base de données

La Figure 27 montre que les impacts totaux de cycle de vie des scénarios modélisés de manière cohérente sous une même base de données sont quasi-similaires à ceux obtenus préalablement en usant d'une combinaison de bases de données US LCI et Ecoinvent. Il est vrai que l'analyse de sensibilité a eu un effet sur les valeurs absolues

des impacts, mais les valeurs relatives (en pourcentage) sont presque les mêmes qu'avant. Cette analyse de sensibilité prouve que les résultats sont robustes, et que les conclusions sont consistantes vis-à-vis le choix des processus fait dans différentes bases de données disponibles dans SimaPro.

3.2.9.4 Analyse de sensibilité et pertinence des résultats sous IMPACT 2002+

La méthode IMPACT2002+ v2.14 est une méthode qui présente quinze catégories d'impact intermédiaires comme présentées au Tableau 30 (voir aussi les tableaux de l'Annexe 7). Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés à la figure ci-dessous (Figure 28). La figure montre que les tendances relatives des profils environnementaux observées sous TRACI sont quasiment conservées dans la plupart des catégories d'impacts sauf pour trois indicateurs à savoir que l'occupation des terres, les effets cancérigènes et les effets non cancérigènes. En effet, pour ces indicateurs les tendances des profils environnementaux sont inversées, c'est-à-dire les performances environnementales du scénario bois+ sont de loin plus élevées que celles des autres scénarios.

Pour ce qui de l'indicateur occupation des terres, celui-ci n'existe pas dans TRACI. De fait, il est impossible de se prononcer sur la conservation des tendances entre les deux méthodes, ou encore, il est impossible de juger la cohérence ou la robustesse des résultats sur la base de cet indicateur.

En ce qui concerne les deux autres indicateurs (effets cancérigènes et les effets non cancérigènes), il est important de souligner que ces deux indicateurs n'ont pas les mêmes unités équivalentes (voir Tableau en Annexe 7). En effet, dans IMPACT 2002+, les deux indicateurs sont exprimés en kilogramme équivalent de chloroéthène (kg eq. C_2H_3Cl), alors que dans TRACI ces derniers sont exprimés en unité de toxicité humaine (CTUh). De plus d'une méthode à l'autre, ces deux indicateurs ne sont pas caractérisés par les mêmes substances. Par conséquent, d'une méthode à l'autre, ils n'ont pas les mêmes facteurs de caractérisation (FCs).

Pour identifier la substance principale contribuant aux impacts très élevés de ces deux indicateurs dans le scénario bois+, une analyse de contribution a été réalisée. La première analyse de contribution a révélé que la contribution maximale provient de l'étape de production des matériaux. Au sein de l'étape de production de matériaux, la contribution maximale provient de l'isolant en panneau de fibre de bois. Au sein de l'isolant en panneau de fibre de bois, la contribution maximale provient de la combustion des résidus du bois (de l'anglais « hog fuel combustion »). L'analyse de contribution du procédé de combustion des résidus révèle que la contribution maximale dans les deux indicateurs provient de la dioxine, une substance émise lors de la combustion du bois. Ainsi, les effets cancérigènes et non cancérigènes sont caractérisés par la dioxine émise dans l'air dont les facteurs de caractérisation sont respectivement de $1,72E+09$ kg eq. C_2H_3Cl /kg de dioxine et $8,7E+09$ kg eq. C_2H_3Cl /kg dioxine. Par contre dans TRACI, les facteurs de caractérisation des effets cancérigènes et effets non cancérigènes sont respectivement de 29,1 CTUh/kg de dioxine et 0 (impact non caractérisé). Cela étant dit, il semble tout à fait impertinent de juger la cohérence des résultats issus des deux méthodes sur la base de ces deux indicateurs.

Néanmoins, en se focalisant sur les trois principales catégories d'impacts telles que mentionnées à la section 3.1, les tendances relatives des profils environnementaux du changement climatique, la destruction de la couche d'ozone et celle de l'énergie non renouvelable sont similaires à celles obtenues sous TRACI. En effet, comparativement au scénario du bâtiment tel que construit, le bâtiment bois+ présente une réduction de 52%, 35% et 49% respectivement pour les indicateurs changement climatique, destruction de la couche d'ozone et énergie non renouvelable. Alors que sous TRACI, les indicateurs similaires affichent une réduction respective de

51%, 35% et 38%. Pour les mêmes catégories d'impacts, la comparaison sous IMPACT 2002+ entre le bâtiment tel que construit et le bâtiment conventionnel présente une différence relative respective de 14%, 34 et 20% alors qu'elle est de 14%, 30% et 20% sous TRACI.

Ainsi, d'une méthode à l'autre, les tendances des résultats ne sont pas inversées. Autrement dit, la comparaison des deux méthodes d'évaluation d'impacts (TRACI et IMPACT 2002+) prouve la cohérence et la robustesse des résultats, ce qui par le même effet, donne une certitude aux conclusions qui découlent de cette étude de cas.

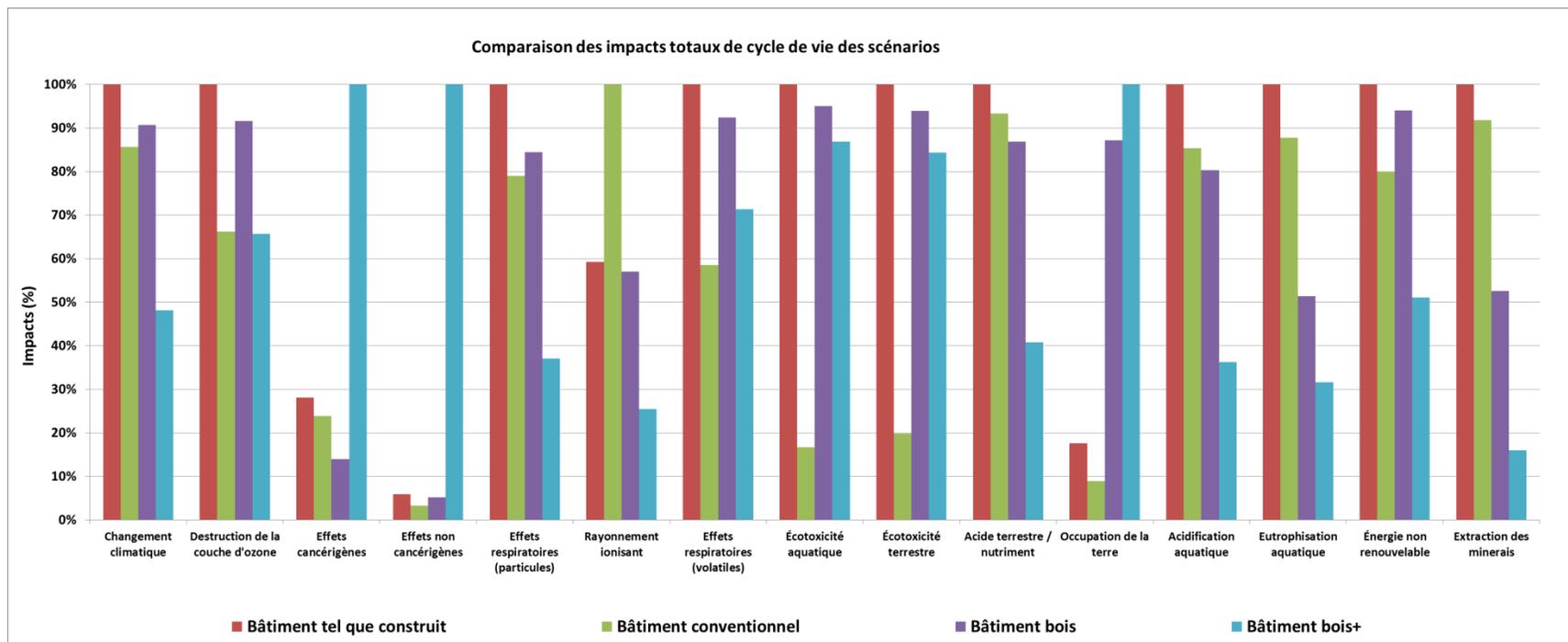


Figure 28. Comparaison des impacts totaux de cycle de vie des scénarios selon la méthode IMPACT 2002+

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a permis d'analyser les impacts de cycle de vie d'un édifice institutionnel net-zéro au Québec. L'évaluation d'impact a permis de mettre en évidence le potentiel de réduction des impacts dans l'environnement bâti par l'application du concept net-zéro et par l'utilisation des matériaux à base du bois. Quatre scénarios ont été définis et analysés dont le scénario de base (bâtiment tel que construit), le scénario conventionnel, le scénario bois et le scénario bois+.

L'étude a montré qu'au Québec, les impacts environnementaux du bâtiment net-zéro sont plus importants que ceux d'un bâtiment conventionnel fonctionnellement équivalent, mais alimenté à l'hydroélectricité. Par contre, si les besoins en chauffage du bâtiment conventionnel sont assurés par un système de chauffage au gaz naturel, les impacts du bâtiment net-zéro sont moins importants que ceux du bâtiment conventionnel. En effet, l'analyse a montré que l'Hydro-Québec, en raison de sa caractéristique de faible émetteur, neutralise le potentiel de réduction d'impacts issus des efforts de haute performance prisés par les exigences normatives liées au net-zéro.

La grande portion des impacts du bâtiment net-zéro provient des matériaux. Cela s'explique par le fait, que l'enveloppe du bâtiment net-zéro consomme plus de matériaux que le bâtiment conventionnel. Les contraintes de performances énergétiques lors de l'étape d'opération poussent à la consommation de plus de matériaux occasionnant, par le même effet, le déplacement des impacts du bâtiment de l'étape d'opération vers l'étape de production des matériaux. Toutefois, l'étude a montré que ce risque de déplacement d'impacts peut être contrôlé en ciblant la consommation des matériaux sobres en carbone. D'ailleurs, l'intégration graduelle des matériaux à base du bois telle qu'illustrée par le scénario bois et le scénario bois+ a montré que l'inclusion de ces matériaux pouvait réduire de 52 % l'émission GES associés à l'étape de production des matériaux dans le bâtiment actuel tel que construit.

Mis à part les matériaux, un autre point qui gonfle les impacts du bâtiment net-zéro tel que construit est la consommation de l'électricité produite sur site. Cette électricité produite par le système photovoltaïque est quatre fois plus émettrice que l'Hydro-Québec. Cela est dû au fait que le système photovoltaïque est une infrastructure dont l'impact est pris en compte dans la production de son électricité. Ainsi, pour chaque kilowattheure produit sur site, les impacts d'une portion de l'infrastructure y sont imputés. Il est tout aussi vrai que la même imputation est faite avec chaque kilowattheure produit par Hydro-Québec, mais les effets de l'infrastructure sont dilués par sa grande capacité de production annuelle d'Hydro-Québec et par l'amortissement de son infrastructure qui est étalé sur une très longue période.

Finalement, une analyse de sensibilité a permis de contextualiser les résultats obtenus selon le contexte particulier du Québec en les juxtaposant avec ceux d'autres provinces comme l'Alberta et l'Ontario. Les résultats ont montré que les bénéfices environnementaux associés à l'intégration du concept net-zéro sont très importants, et ce, même sans considération des matériaux à base du bois. D'ailleurs, les réductions d'impacts observées par l'intégration des matériaux à base du bois sont diluées en Alberta et en Ontario, à cause de l'amplitude des valeurs représentant les impacts globaux des bâtiments dans ces deux provinces. La comparaison a montré que les bénéfices environnementaux de l'intégration des technologies net-zéro seront plus élevés lorsque l'implantation est faite dans une région ayant une source d'énergie mix à très forte intensité en carbone (ex : en Alberta, voir Figure 26). En revanche, les bénéfices environnementaux de l'intégration des

technologies net-zéro seront modérés dans une région où le mix énergétique est à moyenne intensité en carbone (ex : Ontario, voir Figure 25). Elle a aussi permis de tester la robustesse des modèles et des résultats de l'étude.

En conclusion, l'étude a montré que dans le contexte géographique québécois, les impacts de production des matériaux sont très importants dans le cycle de vie d'un bâtiment. Pour mieux s'attaquer à la problématique d'impact provenant de l'usage des matériaux dans un bâtiment, un choix judicieux des matériaux lors de la construction est de mise. Cela dit, les matériaux à faibles impacts ou faibles émissions intrinsèques (ou matériaux sobres) devraient être privilégiés. De fait, les matériaux à base de bois, réputés sobres en carbone, représentent une solution alternative à cette problématique. D'ailleurs, les observations faites dans cette étude sont en ligne avec les conclusions et recommandations du rapport Beaulieu [65].

Somme toute, il sied de souligner que la poursuite de l'atteinte des hautes performances du net-zéro dans un bâtiment pourrait impliquer le déplacement des impacts environnementaux du bâtiment vers d'autres étapes du cycle de vie, en l'occurrence vers l'étape de production et de transport des matériaux. De fait, l'évaluation des performances opérationnelles d'un bâtiment net-zéro ne devrait pas être dissociée de l'approche cycle de vie du bâtiment. Cela dit, il paraît tout à fait important d'avoir une pensée cycle de vie, en intégrant dès l'étape de la préconception des bâtiments, une analyse de cycle de vie dans le choix de matériaux, afin de soutenir le développement et déploiement des bâtiments durables sans tomber dans le piège du déplacement des impacts.

5. LIMITATIONS

Les conclusions de cette étude ne sont valables que pour le bâtiment net-zéro étudié selon les hypothèses qui ont été formulées et justifiées dans le contexte de l'étude. La part de contribution des émissions associées aux matériaux par rapport à l'énergie d'opération a été estimée sans la prise en compte des éléments de finition et autres éléments présentés au Tableau 3. De fait, la distribution 70 % contre 30 % présentée dans cette étude ne peut être généralisée, à moins de tenir compte des mêmes exclusions. La qualité des données primaires et secondaires a été analysée, mais l'analyse d'incertitudes et leurs effets n'ont été analysés que partiellement. Une analyse Monte-Carlo aurait pu être ajoutée pour compléter cette analyse et donner plus de certitude aux comparaisons relatives des résultats.

6. RÉFÉRENCES

1. Commission de la construction du Québec (CCQ). *Commission de la construction du Québec. L'industrie en chiffres 2018* [cited 2018 06-2018].
2. Environment and Climate Change Canada, *National Inventory Report 1990-2015: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada*, in *National Inventory Report*, E.a.C.C. Canada, Editor. 2018, Environment and Climate Change Canada: Ottawa.
3. National Energy Board (NEB), *Provincial and Territorial Energy Profiles – Quebec*, in *Energy Production*, N.E.B. (NEB), Editor. 2018, National Energy Board (NEB): Ottawa.
4. Gouvernement du Québec. *Plan d'action sur les changements climatiques 2013-2020*. Le Québec en action 2012 [cited 2018 06]; Available from: http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/plan_action/pacc2020.pdf.
5. Michele Paleari, Monica Lavagna, and A. Campioli. *Life Cycle Assessment and Zero Energy Residential Buildings*. in *29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*,. 2013. Munich, Germany Sustainable Architecture for a Renewable Future.
6. Finkbeiner, M., et al., *The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006. **11**(2): p. 80-85.
7. International Organization for Standardization (ISO), *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*. 2006.b, ISO14044. : Geneva.
8. International Organization for Standardization (ISO), *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. 2006.a, ISO 14044: Geneva.
9. Stantec, *2016 Canadian Consulting Engineering Awards - Varennes Net-Zero Library*, in *2016 Canadian Consulting Engineering Awards*, Stantec, Editor. 2016.
10. Ressources naturelles Canada (RNCAN). *Le code énergétique pour votre province ou votre territoire*. Le Code national de l'énergie pour les bâtiments– Canada (CNEBC) 2019 01/18/2019 [cited 2019 04/04].
11. Labbé Architecte Laroche et Gagné Architectes Vincent Leclerc et Associés architectes, *Devis technique d'architecture # 12051*, in *Soumission - Devis architecture*, A.e. consortium;, Editor. 2013, Architectes en consortium; Ville de Varennes.
12. Rénaud Fortier. *La bibliothèque net-zéro de Varennes*. VOIRVERT.CA 2012 [cited 2019 3/19]; Available from: <http://www.voirvert.ca/projets/projet-etude/la-bibliotheque-net-zero-varennes>.
13. Jolliet, O., M. Saadé, and P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. Vol. 23. 2010: PPUR Presses polytechniques.
14. Gouvernement du Canada, *TERMIUM Plus - Banque de données terminologiques et linguistiques du gouvernement du Canada*. 2009, Gouvernement du Canada,: Ottawa.
15. L'Office québécois de la langue française (OQLF), *Le Grand dictionnaire terminologique (GDT)*. 2002, Gouvernement du Québec: Québec.
16. European standards, *EN 15978 - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*, in *Calculation method*, E. standards, Editor. 2011, European standards: Czech Republic.

17. Recyc-Québec, *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, in *Gestion des matières résiduelles au Québec*. 2015.
18. Franklin Associates, A.D.o.E.R.G.I., *Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and four polyurethane precursors*, Plastics Division of the American Chemistry Council (ACC), Editor. 2011, Plastics Division of the American Chemistry Council (ACC),.
19. R., H., *Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers*, in *Ecoinvent report No.11*, P.a. Board, Editor. 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Swiss
20. Canadian LCI Database. *New canadian LCI database 2014* [cited 2014 December 12]; Available from: www.ciraig.org/CIRAIG_LCI_DB.
21. Quebec Life Cycle Inventory database. *First Quebec LCI Database*. 2014 [cited 2014 December, 17 2014]; Available from: http://www.empreintecarbonequebec.org/en/projet_base_de_donnees_icv.php.
22. C.; B.J., et al., *TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*. *Journal of Industrial Ecology*, 2003. **6**(4): p. 29.
23. PRé Consultants, *SimaPro, the world's leading sustainability software*. 2016, PRé Consultants BV: The Netherlands.
24. Athena sustainable Materials Institute (ASMI), *A lifecycle assessment of cross-laminated timber produced at Nordic Engineered Wood Products*, in *Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment*, A.s.M.I. (ASMI), Editor. 2013, Athena sustainable Materials Institute (ASMI): Ottawa, ON. p. 37.
25. Athena sustainable Materials Institute (ASMI), *A lifecycle assessment of glulam produced at Nordic*, in *Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment*, A.s.M.I. (ASMI), Editor. 2018, Athena sustainable Materials Institute (ASMI): Ottawa, ON. p. 33.
26. National Renewable Energy Laboratory (NREL), *US life cycle inventory database (US LCI)*, in *US LCI*, NREL, Editor. 2012, NREL.
27. Athena sustainable Materials Institute (ASMI), *Design Building University of Massachusetts, Amherst*. 2017, Athena Institute. p. 54.
28. Athena sustainable Materials Institute (ASMI), *Maintenance, repair and replacement effects for building envelope materials*, in *Building inventory*, A.s.M.I. (ASMI), Editor. 2002, Athena sustainable Materials Institute (ASMI): Ottawa, ON. p. 69.
29. National Association of Home Builders (NAHB), *Study of Life Expectancy of Home Components*. 2007, NAHB.
30. Athena Sustainable Materials Institute (ASMI), *Maintenance, Repair and Replacement Effects for Building Envelope Materials*. 2002, Athena Institute: Ottawa.
31. Federal Office for Building and Regional Planning (FOBRP), *Guideline for Sustainable Building: Assessment of the Sustainability of Buildings and Landholdings (Appendix 6)*. 2001, Federal Office for Building and Regional Planning (FOBRP).
32. Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), *Operations Manual for Maintenance and Custodial Staff of Multi-Unit Residential Buildings*. 2003, Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC),.
33. Cole, R.J. and P.C. Kernan, *Life-cycle energy use in office buildings*. *Building and Environment*, 1996. **31**(4): p. 307-317.

34. Gordon Engineering, *Demolition energy analysis of office building structural systems*, in *Energy Analysis*, A.s.M. Institute, Editor. 1997, Athena sustainable Materials Institute: Ottawa, ON. p. 106.
35. Koehn, E. and G. Brown, *Climatic Effects on Construction*. Journal of Construction Engineering and Management, 1985. **111**(2): p. 8.
36. Récyc-Québec, *Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD)*, Récyc-Québec, Editor. 2018: Québec.
37. Doka, G., *Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services*, in *Waste treatment*, Ecoinvent, Editor. 2003a, Ecoinvent Database: Zurich. p. 111.
38. Remi Morel (AM Demolition), *Courte entrevue sur "comment traitez-vous le béton, l'acier structural ou le bois structural?"*, in *Collecte de données sur la démolition des bâtiments au Québec*, D. Batsy, Editor. 2019.
39. Guy Rivard (AIM - Ecocentre), *Courte entrevue sur "comment traitez-vous le béton, l'acier structural ou le bois structural?"*, D. Batsy, Editor. 2019.
40. Chantelle Provost (Ecocentre Marguerite-D'Youville-Secteur Sud), *Courte entrevue sur "comment traitez-vous le béton, l'acier structural ou le bois structural?"*, D. Batsy, Editor. 2019.
41. Doka, G., *Part V: Building material disposal* in *Waste treatment*, Ecoinvent, Editor. 2003b, Ecoinvent Database: Zurich. p. 56.
42. Jolliet, O., et al., *Environmental life cycle assessment*. 3 ed. 2016: CRC Press, Taylor & Francis Group.
43. United States Environmental Protection Agency (US-EPA), *Analysis of the life cycle impacts and potential for avoided impacts associated with single-family homes*. 2013, US-EPA.
44. Gouvernement du Québec, *Géothermie: Fiche détaillée*. 2010, Agence de l'efficacité énergétique, Québec.
45. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), *Principe de fonctionnement et usages de la géothermie*. 2012, ADEME: Paris, France.
46. Athienitis, A. and W. O'Brien, *Modelling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings*. 2015: Ernst & Sohn, A Wiley Bran. 361.
47. Jungbluth, N., et al., *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*. 2012, ESU-services Ltd.
48. Métro, G., *La roue thermique: fiche technique*, in *Fiche technique*, G. Métro, Editor. 2010.
49. McConnell, S., *Software Estimation: Demystifying the Black Art*. 2006, Redmond, WA, USA: Microsoft Press.
50. Cleden, D., *Managing project uncertainty*. 2017: Routledge.
51. Weidema, B. and M. Wesnaes, *Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators*. Vol. 4. 1996. 167-174.
52. Humbert, S., et al., *IMPACT 2002+ - User guide (Draft for version 2.1). IMPACT Modeling*. 2010, IMPACT 2002+: Lausanne, Switzerland.
53. Grann, B., *A Comparative Life Cycle Assessment of Two Multistory Residential Buildings: Cross-Laminated Timber vs. Concrete Slab and Column with Light Gauge Steel Walls*, in *Life Cycle Assessment (LCA)*. 2013, FPInnovations: Vancouver, BC, Canada.
54. Mahalle, L., *Developement of multi-functional panels for next generation building systems. Part XI.*, in *Life Cycle Assessment (LCA)*. 2015, FPInnovations: Vancouver, BC, Canada.

55. FPInnovations, *Product Category Rules for North American Corrugated Products*, in *FPInnovations - PCR 2018*, FPInnovations, Editor. 2018, FPInnovations: Montreal, Qc, Canada.
56. Fusco, M., U.F. Oberegger, and R. Lollini, *LCA of a Net Zero Energy Office Building - The New Technology Park of Bolzano*. 2017, Institute of Renewable Energy EURAC research: Italy. p. 8.
57. Stephan, A., R.H. Crawford, and K. de Myttenaere, *A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses*. *Applied Energy*, 2013. **112**: p. 23-34.
58. Stephan, A., R.H. Crawford, and K. de Myttenaere, *Towards a comprehensive life cycle energy analysis framework for residential buildings*. *Energy and Buildings*, 2012. **55**: p. 592-600.
59. Treloar, G., et al., *Analysing the life-cycle energy of an Australian residential building and its householders*. *Building Research & Information*, 2000. **28**(3): p. 184-195.
60. Robert H. Crawford, (2011). *Life Cycle Assessment in the Built Environment*. 1st Edition ed. 2011, London: Routledge.
61. Ramesh, T., R. Prakash, and K.K. Shukla, *Life cycle energy analysis of buildings: An overview*. *Energy and Buildings*, 2010. **42**(10): p. 1592-1600.
62. Tumminia, G., et al., *Life cycle energy performances of a Net Zero Energy prefabricated building in Sicily*. *Energy Procedia*, 2017. **140**: p. 486-494.
63. Clermont, A., *Contribution des bâtiments institutionnels dans l'atteinte de l'indépendance énergétique du québec et dans la lutte contre les changements climatiques*. 2015, Université de Sherbrooke: Sherbrooke. p. 107.
64. Institute., A.s.M., *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board*, in *Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment*. 2008a, Athena sustainable Materials Institute.: Ottawa. p. 80.
65. Beaulieu, L., *Rapport du groupe de travail visant à favoriser une utilisation accrue du bois dans la construction*. 2012, Groupe de travail visant à favoriser une utilisation accrue du bois dans la construction: Québec, Qc, Canada.

ANNEXE 1 - PHASE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

PHASE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

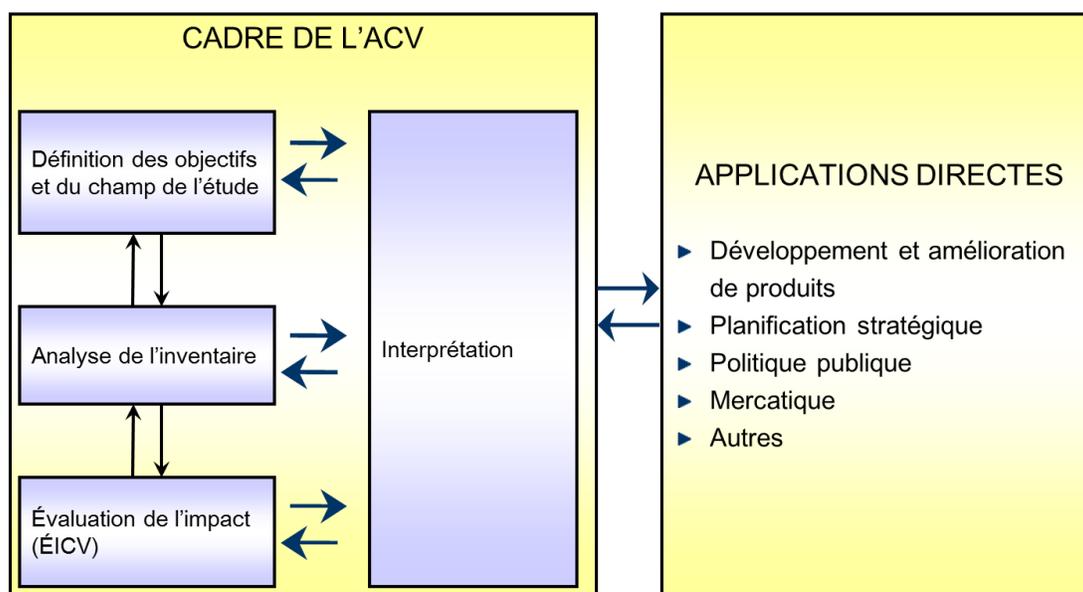


Figure Annexe 1. Les étapes de l'analyse de cycle de vie [8]

6.1 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 choisis. 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).

6.2 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). Pour plus d'informations.

6.3 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 (par exemple, 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.

6.4 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 :

- identification de problèmes importants pour l'impact environnemental;
- évaluation de l'étude en tenant compte de la complétude, de la sensibilité et de la cohérence ; et finalement
- 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 2 – INVENTAIRE AGRÉGÉ

Tableau Annexe 1. Sommaire des inventaires – partie 1

No	A1-A3	Inventaire des matériaux agrégés	TOTALITÉ DES MATÉRIAUX ENTRANT INCLUANT LES DÉCHETS SUR LE SITE				
		Le total des matériaux	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
1		Acier	kg	194,618	194,618	21,416	20,906
2		Béton	kg	1,761,070	1,761,070	1,719,446	1,719,446
3		Bois structure	kg	2,370	2,370	233,625	233,625
4		Contreplaqué	kg	122,828	122,828	122,828	122,828
5		Fourrures	kg	960	960	960	1,008
6		Gravier	kg	5	5	5	5
7		Gypse	kg	76,749	76,749	76,749	76,749
8		Isolant en fibre de bois	kg	0	0	0	119,090
9		Isolant gisé	kg	12,106	34	12,106	34
10		Isolant laine de roche	kg	0	6,039	0	0
11		Isolant Polystyrène	kg	56	56	56	56
12		Isolant semi-rigide	kg	2,894	2,894	1,670	1,670
13		Silicone	kg	232	232	232	232
14		Lattes	kg	6,088	6,088	6,088	6,088
15		Membrane autocollante	kg	5,229	5,229	5,229	5,229
16		Membrane pare-air vapeur	kg	1,296	1,296	1,205	1,205
17		Membrane soprafiltre	kg	7	7	7	7
18		Montants métalliques	kg	8,797	8,797	8,797	8,797
19		Revêtements en bois	kg	4,254	4,254	4,254	16,706
20		Revêtements métalliques (Alu)	kg	20,987	20,987	20,987	12,878
21		Vitre	kg	8,415	8,415	8,415	8,415
22		Tuyaux (éléments chauffants)	kg	286	0	286	286
		Total bâtiment	kg	2,229,247	2,222,928	2,244,361	2,355,260

Tableau Annexe 2. Sommaire des inventaires – partie 2

A4	Tableau 5. Transport	TRANSPORT (A4)				
	Étape de transport	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Énergie de transport*	tkm	714,767	713,920	663,961	783,051
B3	Matériaux de réparation et inventaire	MATÉRIAUX DE RÉPARATION (B3)				
	Étape de réparation	Unité	Scénarios 1	Scénarios 2	Scénarios 3	Scénarios 4
	Mousse polyuréthane	kg	3	3	3	3
	Silicone	kg	442	442	442	442
	Total	kg	445	445	445	445
B4	Inventaire des matériaux remplacés	MATÉRIAUX DE REMPLACEMENT INCLUANT LES DÉCHETS SUR LE SITE D'INSTALLATION (B4)				
	Le total des matériaux	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Contreplaqué	kg	119123	119123	119123	119123
	Fourrures de bois (19x64mm)	kg	249	249	249	316
	Joints en silicone	kg	464	464	464	464
	Lattes de bois emboutvetées	kg	8523	8523	8523	8523
	Membrane autocollante	kg	8997	8997	8997	8997
	Membrane soprafiltre	kg	12	12	12	12
	Revêtement métallique (alu)	kg	6301	6301	6301	4260
	Revêtements en bois (RB2)	kg	0	0	0	17431
	Solin métallique	kg	3052	3052	3052	3052
Vitre (double vitrage)	kg	16830	16830	16830	16830	
	Total des remplacements	kg	163,552	163,552	163,552	179,010
B6	Bilan énergétique (source MRA)	UTILISATION D'ÉNERGIE (B6)				
	Bilan énergétique	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Description		Bâtiment actuel	Référence ASHRAE	Structure bois	Structure bois +
	Demande énergétique	kWh/an	155172	356744	157764	1350574
	Production PV	kWh/an	122742	-	122742	170224
	Déficit ou Excès	kWh/an	-32430	-	-35,022.00	35,167.00
	Ratio (Production/Demande) (%)	(%)	79%	-	77%	126%
	Bilan de réduction de la demande (source MRA)	UTILISATION D'ÉNERGIE (B6)				
Bilan de la réduction de la demande (Ventilation, Chauffage et Clim.)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	
Description		Bâtiment actuel	Référence ASHRAE	Structure bois	Structure bois +	
Système géothermique (réduction de la demande en Chauff & Clim)	MJ/an	539,342	0	537,196	555,998	
Roues thermiques (réduction de la demande en ventilation)	MJ/an	121,117	0	119,064	137,048	

Tableau Annexe 3. Sommaire des inventaires – partie 3

		DÉMOLITION (C1)				
		Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
C1-C2	Énergies de démolition					
	Étape de démolition	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Énergie de démolition	(GJ)	538	538	439	439
	Transport des débris (acier, bois, béton)		TRANSPORT (C2)			
	Transport (C2)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Acier	tkm	23,354	23,354	2,570	2,509
	Bois	tkm	0	0	28,035	28,035
	Béton	tkm	211,328	211,328	206,334	206,334
	Total	tkm	234,683	234,683	236,938	236,877
	Transport vers le centre de tri		TRANSPORT (C2)			
Transport (C2)	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	
Quantité de matériaux en vrac transportée (excluant le bois, l'aci	tonne	438	431	434	561	
Transport	tkm	52,507	51,748	52,065	67,289	
C3	Énergies de triage au centre de tri	ENRGIE DE TRIAGE (C3)				
	Énergie	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Broyeur (électrique)	(GJ)	6	6	6	7
	Convoyeur (électrique)	(GJ)	3	3	3	4
	Chargeur (Diesel)	(GJ)	2	2	2	2
	Transport de la matière résiduelle		TRANSPORT FINAL VERS LE LIEU D'ENFOUISSEMENT			
	Transport des déchets	Unité	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	Résidus pour élimination (rejets) (23%)	tkm	12,077	11,902	11,975	15,476

ANNEXE 3 – DÉTAILS DES INVENTAIRES

RÉSUMÉ DES INVENTAIRES DE LA STRUCTURE BÉTON-ACIER

Tableau Annexe 4. Sommaire des inventaires béton et armatures

Béton						
Niveau	Volume béton (m ³)					
Fondation	423	Onglet béton				
Sous-sol	41	Onglet béton				
RDC	117	Onglet béton				
Étage	124	Onglet béton				
Toiture	-					
Total brut	705					
Réduction du volume d'acier	6					
Total net	699					
Armature pour béton						
Type	Quantité armature (kg)					
Armature colonnes	6417					
Armature mur	19130					
Armature semelle	13229					
Armature empattement	927					
Armature poutre	1631					
Armature dalle	6836					
Total	48171					
Acier charpente et poutre						
Niveau	Partie A	Partie B		Partie C	Partie D	Masse totale (kg)
	Colonne	Contreventement	Mur extrémité	Poutres/ Fermes / Poutrelles / Porte-à-faux	Entretroise / Cornière / Plaques	
Fondation	-		-	-	1944	1944
RDC	13641	3116	-	-	-	16757
Étage	18615	2125	1912	25713	1397	49762
Toiture				51793	3061	54854
TOTAL	32256		7153	77505	6403	123316
				Pondération	5%	6166
				(5%-10%)	Total (kg)	129482

Tableau Annexe 5. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 1

Type/file	armature longitudinale				armature transversale				Total par empattement			Total	
	Nombre	diamètre (mm)	longueur (mm)	Volume (mm ³)	Nombre	diamètre (mm)	longueur (mm)	Volume (mm ³)	Total volume (m ³)	densité (kg/m ³)	Masse totale (kg)	Nombre	Masse totale (kg)
A	6	16	1350	1628602	6	16	1350	1628602	0.003	7850	26	6	153
B	10	19.5	2350	7018220	10	19.5	2350	7018220	0.014	7850	110	1	110
C	7	19.5	1850	3867487	7	19.5	1850	3867487	0.008	7850	61	2	121
D	6	19.5	1350	2419046	6	19.5	1350	2419046	0.005	7850	38	6	228
E	9	19.5	3130	8412904	14	19.5	1850	7734974	0.016	7850	127	2	254
F	7	19.5	1850	3867487	7	19.5	1850	3867487	0.008	7850	61	1	61
TOTAL													927

ACIER CHARPENTE

Tableau Annexe 6. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 2

PARTIE A														
Niveau	Type	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Brides			Âme		Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)
					Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)						
RDC	Colonne	A*1.4	Type "A" W200x31	210	134	10.2	6.4	4400	1	17366976	0.017	7850	136	
RDC	Colonne	A*2	Type "A" W200x31	210	134	10.2	6.4	4400	1	17366976	0.017	7850	136	
RDC	Colonne	A*2.5	Type "A" W200x31	210	134	10.2	6.4	4400	1	17366976	0.017	7850	136	
RDC	Colonne	A*3	Type "A" W200x31	210	134	10.2	6.4	4400	1	17366976	0.017	7850	136	
RDC	Colonne	A1.1	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	A1.2	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	3380	1	55986726	0.056	7850	439	
RDC	Colonne	A2.1	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	A2.2	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	9857	1	163272531	0.163	7850	1282	
RDC	Colonne	A3.1	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	A3.2	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	3380	1	55986726	0.056	7850	439	
RDC	Colonne	B1.1	Type "C" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	B1.2	Type "C" W250x131	275	261	25.1	15.4	3380	1	55986726	0.056	7850	439	
RDC	Colonne	B2.1	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	B2.2	Type "B" W250x131	275	261	25.1	15.4	9857	1	163272531	0.163	7850	1282	
RDC	Colonne	B3.1	Type "C" W250x131	275	261	25.1	15.4	4400	1	72882128	0.073	7850	572	
Étage	Colonne	B3.2	Type "C" W250x131	275	261	25.1	15.4	3380	1	55986726	0.056	7850	439	
RDC	Colonne	C1.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	C1.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
RDC	Colonne	C2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	C2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779	
RDC	Colonne	C3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	C3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3255	1	32774986	0.033	7850	257	
RDC	Colonne	D1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	D1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
RDC	Colonne	D2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	D2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779	
RDC	Colonne	D3.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	D3.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
RDC	Colonne	E1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	E1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
RDC	Colonne	E2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	E2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779	
RDC	Colonne	E3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	E3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
RDC	Colonne	F1.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348	
Étage	Colonne	F1.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267	
PARTIE A														
Niveau	Type	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Brides			Âme		Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)
					Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)						

Tableau Annexe 7. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 3

PARTIE A													
Niveau	Type	Localisation	Type	Brides			Âme			Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)
				Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)					
RDC	Colonne	F2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348
Étage	Colonne	F2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779
RDC	Colonne	F3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348
Étage	Colonne	F3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	G1.1	Type "D" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348
Étage	Colonne	G1.2	Type "D" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	G2.1	Type "E" W250x80	256	255	15.6	9.4	4400	1	44304128	0.044	7850	348
Étage	Colonne	G2.2	Type "E" W250x80	256	255	15.6	9.4	9844	1	99120417	0.099	7850	778
RDC	Colonne	G3.1	Type "F" W250x80	256	255	15.6	9.4	4050	1	40779936	0.041	7850	320
Étage	Colonne	G3.2	Type "F" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	Ix1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Ix1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	Ix2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Ix2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779
RDC	Colonne	Ix3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4050	1	40779936	0.041	7850	320
Étage	Colonne	Ix3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3460	1	34839155	0.035	7850	273
RDC	Colonne	Jx1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Jx1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	Jx1.6.1	Type "J" W150x18	153	102	7.1	5.8	4300	1	9689792	0.010	7850	76
RDC	Colonne	Jx2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Jx2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779
RDC	Colonne	Jx3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4050	1	40779936	0.041	7850	320
Étage	Colonne	Jx3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3460	1	34839155	0.035	7850	273
RDC	Colonne	JK1.1	Type "J" W150x18	153	102	7.1	5.8	4300	1	9689792	0.010	7850	76
RDC	Colonne	JK2.1	Type "J" W150x18	153	102	7.1	5.8	4300	1	9689792	0.010	7850	76
RDC	Colonne	K1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Kx1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	Kx2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Kx2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9857	1	99251316	0.099	7850	779
RDC	Colonne	Kx3.1	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Kx3.2	Type "C" W250x80	256	255	15.6	9.4	3460	1	34839155	0.035	7850	273
Étage	Colonne	Lx1.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3380	1	34033626	0.034	7850	267
RDC	Colonne	L1.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
RDC	Colonne	Lx2.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Lx2.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	9850	1	99180832	0.099	7850	779
RDC	Colonne	Lx1.6.1	Type "B" W250x49	247	202	11	7.4	4300	1	26268700	0.026	7850	206
RDC	Colonne	Lx3.1	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	4300	1	43297216	0.043	7850	340
Étage	Colonne	Lx3.2	Type "B" W250x80	256	255	15.6	9.4	3460	1	34839155	0.035	7850	273
Étage	Colonne	B1.3 et A1.3	W150x37	162	154	11.6	8.1	4255	2	39972151	0.040	7850	314
Étage	Colonne	Axe A 1@3	HSS 203x152x9.8	203	152	9.8		41568	1	273261381	0.273	7850	2145
												TOTAL	32256

Tableau Annexe 8. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 4

PARTIE B													
Niveau	Partie	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Type	Longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)
RDC	Contreventement	K@L	HSS 203x203x9.5	203	203	9.5		4571	2	67218647	0.067	7850	528
Étage	Contreventement	K@L	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4389	2	39194868	0.039	7850	308
RDC	Contreventement	B@C	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		5162	2	56104570	0.056	7850	440
Étage	Contreventement	B@C	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4326	2	38631308	0.039	7850	303
RDC	Contreventement	F@G	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		5168	2	56164337	0.056	7850	441
Étage	Contreventement	F@G	HSS 152x102x9.8	152	102	9.8		4333	2	39809783	0.040	7850	313
RDC	Contreventement	F@E	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		5162	2	56104570	0.056	7850	440
Étage	Contreventement	F@E	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4326	2	38631308	0.039	7850	303
RDC	Contreventement	C@B	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		5162	2	56104570	0.056	7850	440
Étage	Contreventement	C@B	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4326	2	38631308	0.039	7850	303
RDC	Contreventement	K@J	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		5077	2	55181193	0.055	7850	433
Étage	Contreventement	K@J	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4389	2	39192019	0.039	7850	308
RDC	Contreventement	I@G	HSS 178x127x9.5	178	127	9.5		4606	2	50061658	0.050	7850	393
Étage	Contreventement	I@G	HSS 152x102x9.5	152	102	9.5		4097	2	36588413	0.037	7850	287
Étage	Mur extrémité	Axe A 1@3	HSS 152x152x6.4	152	152	6.4		2667	11	109349560	0.109	7850	858
Étage	Mur extrémité	Axe A 1@3	HSS 152x152x6.4	152	152	6.4		1334	2	9940869	0.010	7850	78
Étage	Mur extrémité	Axe L x1@x3	HSS 152x152x6.4	152	152	6.4		2667	12	119290429	0.119	7850	936
Étage	Mur extrémité	Axe L x1@x3	HSS 152x152x6.4	152	152	6.4		1334	1	4970435	0.005	7850	39
												TOTAL	7153

Tableau Annexe 9. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 5

PARTIE C													
Niveau	Partie	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Brides			Âme				
						Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)
Toiture - Versant nord	Poutre	L@A	W610x101	603	228	14.9	10.5	10741	9	1238619897	1.239	7850	9723
Toiture - Versant sud	Poutre	L	W530x92	533	209	15.6	10.2	10691	1	124434260	0.124	7850	977
Toiture - Versant sud	Poutre	K@I	W610x101	603	228	14.9	10.5	10694	3	411066666	0.411	7850	3227
Toiture - Versant sud	Poutre	G@B	W610x101	603	228	14.9	10.5	10747	6	826207866	0.826	7850	6486
Toiture - Versant nord	Poutre	L@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	19	342433656	0.342	7850	2688
Toiture - Versant nord	Poutre	I@G	W200x27	207	133	8.4	5.8	15564	1	51945784	0.052	7850	408
Toiture - Versant nord	Poutre	G@F	W200x27	207	133	8.4	5.8	5421	6	108557477	0.109	7850	852
Toiture - Versant nord	Poutre	G@F	W200x42	205	166	11.8	7.2	5421	1	28317569	0.028	7850	222
Toiture - Versant nord	Poutre	F@A	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	37	666844488	0.667	7850	5235
Toiture - Versant sud	Poutre	M@L	W150x22	152	152	6.6	5.8	3600	8	80969472	0.081	7850	636
Toiture - Versant sud	Poutre	M@L	W460x52	450	152	10.8	7.6	3600	1	23540544	0.024	7850	185
Toiture - Versant sud	Poutre	M@L	W530x72	529	166	13.6	9.7	3600	1	33777576	0.034	7850	265
Toiture - Versant sud	Poutre	K@L	W150x22	152	152	6.6	5.8	5400	2	30363552	0.030	7850	238
Toiture - Versant sud	Poutre	K@L	W250x33	258	146	9.1	6.1	5400	1	22247892	0.022	7850	175
Toiture - Versant sud	Poutre	K@L	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	5	90114120	0.090	7850	707
Toiture - Versant sud	Poutre	K@L	W462x52	450	152	10.8	7.6	5400	1	35310816	0.035	7850	277
Toiture - Versant sud	Poutre	K@I	W150x22	152	152	6.6	5.8	5400	4	60727104	0.061	7850	477
Toiture - Versant sud	Poutre	K@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	16	288365184	0.288	7850	2264
Toiture - Versant sud	Poutre	I@G	W150x27	152	152	6.6	5.8	3000	2	16868640	0.017	7850	132
Toiture - Versant sud	Poutre	I@G	W200x27	207	133	8.4	5.8	26198	1	87437397	0.087	7850	686
Toiture - Versant sud	Poutre	G@F	W200x42	205	166	11.8	7.2	7672	10	400760730	0.401	7850	3146
Toiture - Versant sud	Poutre	F@A	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	49	883118376	0.883	7850	6932
Toiture - Versant sud	Poutre	A@A*	W200x27	207	133	8.4	5.8	1100	3	11013948	0.011	7850	86
Toiture - Versant sud	Poutre	A@A*	W200x17	203	102	6.5	5.8	1100	5	13354000	0.013	7850	105
Toiture - Versant sud	Poutre	A@A*	W150x22	152	152	6.6	5.8	1100	2	6185168	0.006	7850	49
Toiture - Versant sud	Poutre	L@I	W250x67	257	204	15.7	8.9	4210	6	212523494	0.213	7850	1668
Toiture - Versant sud	Poutre	I@G	W150x22	152	152	6.6	5.8	2235	4	25134274	0.025	7850	197
Étage	Ferme	B	800 mm prof	-	-	-	-	8550	1	-	-	7850	115
Étage	Ferme	C	800 mm prof	-	-	-	-	17100	1	-	-	7850	231
Étage	Ferme	D	800 mm prof	-	-	-	-	17100	1	-	-	7850	231
Étage	Ferme	E	800 mm prof	-	-	-	-	17100	1	-	-	7850	231
Étage	Ferme	F	800 mm prof	-	-	-	-	17100	1	-	-	7850	231
Étage	Ferme	G	800 mm prof	-	-	-	-	17100	1	-	-	7850	231
Étage	Ferme	I	800 mm prof	-	-	-	-	8550	1	-	-	7850	115
Étage	Ferme	J	800 mm prof	-	-	-	-	8550	1	-	-	7850	115
Étage	Poutre	A@B	W150x22	152	152	6.6	5.8	1515	1	4259332	0.004	7850	33
Étage	Poutre	A@B	W150x22	152	152	6.6	5.8	2445	1	6873971	0.007	7850	54
Étage	Poutre	A@B	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	2	36045648	0.036	7850	283
Étage	Poutre	A@B	W610x82	599	178	12.8	10	5400	1	55570320	0.056	7850	436
Étage	Poutre	A@B	W200x27	207	133	8.4	5.8	3525	1	11764899	0.012	7850	92
Étage	Poutre	A*	W150x22	152	152	6.6	5.8	5700	1	16025208	0.016	7850	126
Étage	Poutre	A*	W200x22	206	102	8	6.2	8550	1	24025500	0.024	7850	189
Étage	Poutre	A	W530x66	525	165	11.4	8.9	17100	1	140760018	0.141	7850	1105
Étage	Poutre	A@F	W200x27	207	133	8.4	5.8	27000	1	90114120	0.090	7850	707
Étage	Poutre	B@F axe 3+	W200x27	207	133	8.4	5.8	21600	1	72091296	0.072	7850	566
Étage	Poutre	A@F axe 3	W200x27	207	133	8.4	5.8	27000	1	90114120	0.090	7850	707
Étage	Poutre	A@F axe 3+	W200x27	207	133	8.4	5.8	27000	1	90114120	0.090	7850	707
Étage	Poutre	F@G axe 3	W200x59	210	205	14.2	9.1	7672	1	57344824	0.057	7850	450
Étage	Poutre	F@G axe 3+	W200x59	210	205	14.2	9.1	7672	2	114689649	0.115	7850	900
Étage	Poutre	F@G	W200x27	207	133	8.4	5.8	5421	1	18092913	0.018	7850	142
Étage	Poutre	B	W530x92	533	209	15.6	10.2	3420	1	39805927	0.040	7850	312
Étage	Poutre	I	W530x66	525	165	11.4	8.9	8550	1	70380009	0.070	7850	552
Étage	Poutre	J	W530x66	525	165	11.4	8.9	8550	1	70380009	0.070	7850	552
Étage	Poutre	K	W530x66	525	165	11.4	8.9	17100	1	140760018	0.141	7850	1105
Étage	Poutre	1.2@2	W360x33	349	127	8.5	5.8	5700	6	139693320	0.140	7850	1097
Étage	Poutre	G@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	4389	2	29297102	0.029	7850	230
Étage	Poutrelles	B@C	550 mm prof	-	-	-	-	5400	11	-	-	7850	802

PARTIE C (SUITE)													
Niveau	Partie	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Brides			Âme				
						Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)	Longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	

Tableau Annexe 10. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 6

PARTIE C (SUITE)				Brides			Âme		Longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	
Niveau	Partie	Localisation	Type	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Épaisseur (mm)							
Étage	Poutrelles	C@D	550 mm prof	-	-	-	-	5400	11	-	-	7850	802	
Étage	Poutrelles	D@E	550 mm prof	-	-	-	-	5400	11	-	-	7850	802	
Étage	Poutrelles	E@F	550 mm prof	-	-	-	-	5400	11	-	-	7850	802	
Étage	Poutrelles	F@G	550 mm prof	-	-	-	-	6546.5	11	-	-	7850	972	
Étage	Poutre	I@G	W200x27	207	133	8.4	5.8	2137	2	14264731	0.014	7850	112	
Étage	Poutre	I@G	W150x22	152	152	6.6	5.8	30358	1	85349696	0.085	7850	670	
Étage	Poutre	I@G	W150x22	152	152	6.6	5.8	2339	1	6575958	0.007	7850	52	
Étage	Poutre	I@G	W200x27	207	133	8.4	5.8	4389	2	29297102	0.029	7850	230	
Étage	Poutre	I@G	W200x42	205	166	11.8	7.2	4389	1	22926732	0.023	7850	180	
Étage	Poutre	I@G	W150x22	152	152	6.6	5.8	1865	1	5243336	0.005	7850	41	
Étage	Poutre	J@I	W150x22	152	152	6.6	5.8	5400	1	15181776	0.015	7850	119	
Étage	Poutre	J@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutre	J@I	W150x22	152	152	6.6	5.8	1570	1	4413961	0.004	7850	35	
Étage	Poutre	J@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	2800	1	9345168	0.009	7850	73	
Étage	Poutre	J@I	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutre	J@I axe x3	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutrelles	J@I	550 mm prof	-	-	-	-	5400	9	-	-	7850	656	
Étage	Poutrelles	K@J	550 mm prof	-	-	-	-	5400	5	-	-	7850	365	
Étage	Poutre	K@J	W200x42	205	166	11.8	7.2	5400	1	28207872	0.028	7850	221	
Étage	Poutre	K@J	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	2	36045648	0.036	7850	283	
Étage	Poutre	K@J	W150x22	152	152	6.6	5.8	2015	4	22660206	0.023	7850	178	
Étage	Poutre	K@J	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutre	K@J	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutre	K@L	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	8	144182592	0.144	7850	1132	
Étage	Poutre	K@L	W460x52	450	152	10.8	7.6	5400	1	35310816	0.035	7850	277	
Étage	Poutre	K@L	W530x72	529	166	13.6	9.7	5400	1	50666364	0.051	7850	398	
Étage	Poutre	K@L	W410x46	403	140	11.2	7	5400	1	31321080	0.031	7850	246	
Étage	Poutre	L@M	W530x72	529	166	13.6	9.7	3600	1	33777576	0.034	7850	265	
Étage	Poutre	L@M	W150x22	152	152	6.6	5.8	19042	1	53535440	0.054	7850	420	
Étage	Poutre	L@M	W460x52	450	152	10.8	7.6	1957	1	12796901	0.013	7850	100	
Étage	Poutre	L@M	W150x22	152	152	6.6	5.8	3498	1	9834417	0.010	7850	77	
Étage	Poutre	X2@X3	W410x46	403	140	11.2	7	8550	1	49591710	0.050	7850	389	
Étage	Poutre	X1@X2	W410x39	399	140	8.8	6.4	8550	1	41937408	0.042	7850	329	
Étage	Poutre	M	W460x89	463	192	17.7	10.5	8550	1	96500430	0.097	7850	758	
Étage	Poutre	M	W460x61	450	189	10.8	8.1	8550	1	64573362	0.065	7850	507	
Étage	Poutre	X1+@X2	W200x27	207	133	8.4	5.8	5262.5	1	17563910	0.018	7850	138	
Étage	Poutre	X1@X1.6	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Étage	Poutre	X1@X1.6	W200x42	205	166	11.8	7.2	10800	1	56415744	0.056	7850	443	
Étage	Poutre	K@L	W200x27	207	133	8.4	5.8	5400	1	18022824	0.018	7850	141	
Toiture - Versant sud	Poutre	X1@X3	W460x74	457	190	14.5	9	17418	1	163067316	0.163	7850	1280	
Toiture	Porte-à-faux	A@B	W610x101	603	228	14.9	10.5	1292	1	16554396	0.017	7850	130	
Toiture	Porte-à-faux	B@C	W610x101	603	228	14.9	10.5	1706	1	21858978	0.022	7850	172	
Toiture	Porte-à-faux	C@D	W610x101	603	228	14.9	10.5	1706	1	21858978	0.022	7850	172	
Toiture	Porte-à-faux	D@E	W610x101	603	228	14.9	10.5	1706	1	21858978	0.022	7850	172	
Toiture	Porte-à-faux	E@F	W610x101	603	228	14.9	10.5	1706	1	21858978	0.022	7850	172	
Toiture	Porte-à-faux	F@G	W610x101	603	228	14.9	10.5	1706	1	21858978	0.022	7850	172	
Toiture	Porte-à-faux	G@I	W610x101	603	228	14.9	10.5	2592	1	33211296	0.033	7850	261	
Toiture	Porte-à-faux	I@J	W610x101	603	228	14.9	10.5	3063	1	39246219	0.039	7850	308	
Toiture	Porte-à-faux	J@K	W610x101	603	228	14.9	10.5	3022	1	38720886	0.039	7850	304	
Toiture	Porte-à-faux	K@L	W610x101	603	228	14.9	10.5	3022	1	38720886	0.039	7850	304	
Toiture	Porte-à-faux	L@M	W610x101	603	228	14.9	10.5	3022	1	38720886	0.039	7850	304	
TOTAL												77505		

Tableau Annexe 11. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 7

PARTIE D													
Niveau	Partie	Type	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Densité linéaire (kg/m)	Longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)	
-	Plaques d'assises	Type "A"	226	150	20	-	-	4	2712000	0.003	7850	21	
-	Plaques d'assises	Type "B"	330	340	25	-	-	21	58905000	0.059	7850	462	
-	Plaques d'assises	Type "C"	430	680	50	-	-	10	146200000	0.146	7850	1148	
-	Plaques d'assises	Type "D"	430	680	50	-	-	1	14620000	0.015	7850	115	
-	Plaques d'assises	Type "E"	330	340	25	-	-	1	2805000	0.003	7850	22	
-	Plaques d'assises	Type "F"	430	680	50	-	-	1	14620000	0.015	7850	115	
-	Plaques d'assises	Type "G"	350	400	25	-	-	1	3500000	0.004	7850	27	
-	Plaques d'assises	Type "H"	330	190	25	-	-	2	3135000	0.003	7850	25	
-	Plaques d'assises	Type "J"	170	115	20	-	-	3	1173000	0.001	7850	9	
Toiture - Versant nord	Entretoise	A@G	L64x64x6.4	-	-	-	5.84	10747	6	-	-	377	
Toiture - Versant nord	Entretoise	G@L	L64x64x6.4	-	-	-	5.84	10694	3	-	-	187	
Toiture - Versant sud	Entretoise	L@G	L64x64x6.4	-	-	-	5.84	10694	3	-	-	187	
Toiture - Versant sud	Entretoise	G@A*	L64x64x6.4	-	-	-	5.84	10747	6	-	-	377	
Étage	Cornière	A@B	L76x76x7.9	-	-	-	11	8151	2	-	-	179	
Étage	Entretoise	A@B	L45x45x5	-	-	-	3.34	8550	1	-	-	29	
Étage	Entretoise	B@G	L45x45x5	-	-	-	3.34	17100	5	-	-	286	
Étage	Entretoise	I@J	L45x45x5	-	-	-	3.34	13747.5	1	-	-	46	
Étage	Entretoise	J@K	L45x45x5	-	-	-	3.34	8550	1	-	-	29	
Étage	Cornière	A*@A	C150x12	-	-	-	12	810	12	-	-	117	
Étage	Cornière	A@B	C150x12	-	-	-	12	5400	1	-	-	65	
Étage	Cornière	M@L	C200x21	-	-	-	21	3600	1	-	-	76	
Toiture - Versant nord	Cornière	A@K	C150x12	-	-	-	12	5400	7	-	-	454	
Toiture - Versant nord	Cornière	I@G	C150x12	-	-	-	12	4389	1	-	-	53	
Toiture - Versant nord	Cornière	A@K	C150x12	-	-	-	12	9780	7	-	-	822	
Toiture - Versant nord	Cornière	I@G	C150x12	-	-	-	12	4890	1	-	-	59	
Toiture - Versant nord	Cornière	X1@X3 sur axe L	C200x17	-	-	-	17	10720	1	-	-	182	
Toiture - Versant nord	Cornière	X1@X3 sur Axe A*	C200x17	-	-	-	17	10741	1	-	-	183	
Toiture - Versant sud	Cornière	X1@X3 sur Axe A*	C200x17	-	-	-	17	10718	1	-	-	182	
Étage	Cornière	K@J et X1@X1.6	C150x12	-	-	-	12	18885	1	-	-	227	
Étage	Cornière	L@K et X2.2@X3	HSS 89x89x6.4	89	89	6.4	-	20820	1	44025139	0.044	7850	346
											TOTAL	6403	

Tableau Annexe 12. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 8

Niveau	Type d'élément	Type	Armature horizontale					Étrier						Volume total (mm ³)	Volume total (m ³)	densité (kg/m ³)	Masse totale (kg)
			Longueur (mm)	Nombre	Type	diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Espacement	Nombre	Type	Longueur (mm)	diamètre (mm)	Volume (mm ³)				
Fondation	Poutre	P1	3930	3	25M	25.2	5880372	175	23	10M	1550	11.3	3575249	9455621	0.009	7850	74
			3930	5	25M	25.2	9800619						0	9800619	0.010	7850	77
Fondation	Poutre	P2	3435	3	25M	25.2	5139714	175	20	10M	1550	11.3	3108912	8248626	0.008	7850	65
			3435	5	25M	25.2	8566190						0	8566190	0.009	7850	67
Fondation	Poutre	P3	1680	3	25M	25.2	2513747	175	10	10M	1550	11.3	1554456	4068203	0.004	7850	32
			1680	5	25M	25.2	4189578						0	4189578	0.004	7850	33
Fondation	Poutre	P4	4347	4	25M	25.2	8672426	250	18	10M	1950	11.3	3520091	12192517	0.012	7850	96
			4347	3	25M	25.2	6504319						0	6504319	0.007	7850	51
Fondation	Poutre	P5	1335	3	25M	25.2	1997531	175	8	10M	1400	11.3	1123220	3120751	0.003	7850	24
			1335	2	25M	25.2	1331687						0	1331687	0.001	7850	10
Fondation	Poutre	P6	2755	3	25M	25.2	4122245	175	16	10M	1400	11.3	2246440	6368685	0.006	7850	50
			2755	2	25M	25.2	2748163						0	2748163	0.003	7850	22
Fondation	Poutre	P7	2760	3	25M	25.2	4129727	175	16	10M	1600	11.3	2567360	6697086	0.007	7850	53
			2760	2	25M	25.2	2753151						0	2753151	0.003	7850	22
Fondation	Poutre	P8	1680	3	25M	25.2	2513747	175	10	10M	1600	11.3	1604600	4118346	0.004	7850	32
			1680	2	25M	25.2	1675831						0	1675831	0.002	7850	13
Fondation	Poutre	P9	5057	6	25M	25.2	15133353	200	26	10M	2000	11.3	5214950	20348303	0.020	7850	160
			5057	8	25M	25.2	20177804						0	20177804	0.020	7850	158
Fondation	Poutre	P10	5400	3	25M	25.2	8079900	150	36	10M	1100	11.3	3971385	12051285	0.012	7850	95
			5400	3	20M	25.2	8079900						0	8079900	0.008	7850	63
Fondation	Poutre	P11	1335	3	20M	19.5	1196084	150	9	10M	1100	11.3	992846	2188930	0.002	7850	17
			1335	2	20M	19.5	797389						0	797389	0.001	7850	6
Fondation	Poutre	P12	5400	3	20M	19.5	4838092	200	27	10M	1300	11.3	3520091	8358183	0.008	7850	66
			5400	2	20M	19.5	3225395						0	3225395	0.003	7850	25
Fondation	Poutre	P13	4389	3	20M	19.5	3932294	200	22	10M	1250	11.3	2757906	6690200	0.007	7850	53
			4389	2	20M	19.5	2621529						0	2621529	0.003	7850	21
Fondation	Poutre	P14	1930	3	20M	19.5	1729170	200	10	10M	1300	11.3	1303737	3032907	0.003	7850	24
			1930	2	20M	19.5	1152780						0	1152780	0.001	7850	9
Fondation	Poutre	P15	1955	3	20M	19.5	1751568	200	10	10M	1300	11.3	1303737	3055306	0.003	7850	24
			1955	2	20M	19.5	1167712						0	1167712	0.001	7850	9
Fondation	Poutre	P16	1930	3	20M	19.5	1729170	200	10	10M	1300	11.3	1303737	3032907	0.003	7850	24
			1930	2	20M	19.5	1152780						0	1152780	0.001	7850	9
Fondation	Poutre	P17	5115	3	25M	25.2	7653461	250	21	10M	1500	11.3	3159056	10812517	0.011	7850	85
			5115	2	25M	25.2	5102307						0	5102307	0.005	7850	40
Fondation	Poutre	P18	1335	3	20M	19.5	1196084	200	7	10M	1300	11.3	912616	2108700	0.002	7850	17
			1335	2	20M	19.5	797389						0	797389	0.001	7850	6
																TOTAL	1631

BÉTON

Tableau Annexe 13. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 9

n0	Niveau	Type d'élément	Type	Aire (mm ²)	Largeur (mm)	Longueur (mm)	Hauteur/épaisseur (mm)	Volume béton (mm ³)	Nombre	Volume béton total (mm ³)	Volume béton total (m ³)
1	Fondation	Colonne	Type 1	-	400	400	550	88000000	7	616000000	0.616
2	Fondation	Colonne	Type 2	-	400	570	1075	245100000	4	980400000	0.980
3	Fondation	Colonne	Type 3 empatement à EL 6100	-	800	645	3550	1831800000	1	1831800000	1.832
4	Fondation	Colonne	Type 3 empatement à EL 8575	-	800	645	1075	554700000	6	3328200000	3.328
5	Fondation	Colonne	Type 4	-	225	300	1075	72562500	4	290250000	0.290
6	Fondation	Colonne	Type 5	-	400	570	1075	245100000	1	245100000	0.245
7	Fondation	Colonne	Type 6	-	400	495	3550	702900000	1	702900000	0.703
8	Fondation	Colonne	Type 7	-	600	645	3650	1412550000	1	1412550000	1.413
9	Fondation	Colonne	Type 8	-	800	645	3900	2012400000	1	2012400000	2.012
10	Fondation	Colonne	Type 9	-	800	645	3900	2012400000	1	2012400000	2.012
11	Fondation	Colonne	Type 10	-	800	645	3900	2012400000	1	2012400000	2.012
12	Fondation	Colonne	Type 11	-	400	514	3650	750440000	2	1500880000	1.501
13	Fondation	Colonne	Type 12	-	545	500	3650	994625000	1	994625000	0.995
14	Fondation	Colonne	Type 13	-	495	500	3650	903375000	2	1806750000	1.807
15	Fondation	Colonne	Type 14	-	650	745	3650	1767512500	1	1767512500	1.768
16	Fondation	Colonne	Type 15	-	400	400	3650	584000000	2	1168000000	1.168
17	Fondation	Colonne	Type 16	-	600	600	4550	1638000000	1	1638000000	1.638
18	Fondation	Colonne	Type 17	-	400	400	3900	624000000	5	3120000000	3.120
19	Fondation	Colonne	Type 18	-	400	600	1570	376800000	1	376800000	0.377
20	Fondation	Colonne	Type 19	-	800	645	3550	1831800000	1	1831800000	1.832
21	Fondation	Colonne	Type 20	-	250	250	3900	243750000	3	731250000	0.731
22	Fondation	Empattement	Type A	-	1500	1500	300	675000000	6	4050000000	4.050
23	Fondation	Empattement	Type B	-	2500	2500	400	2500000000	1	2500000000	2.500
24	Fondation	Empattement	Type C	-	2000	2000	300	1200000000	2	2400000000	2.400
25	Fondation	Empattement	Type D	-	1500	1500	300	675000000	6	4050000000	4.050
26	Fondation	Empattement	Type E	-	2000	3280	300	1968000000	2	3936000000	3.936
27	Fondation	Semelle filante	A@AB	-	1200	3500	300	1260000000	1	1260000000	1.260
28	Fondation	Semelle filante	AB@CD	-	2500	9200	300	6900000000	1	6900000000	6.900
29	Fondation	Semelle filante	CD@EF	-	1200	13300	300	4788000000	1	4788000000	4.788
30	Fondation	Semelle filante	EF@GJ	-	2500	9634	300	7225500000	1	7225500000	7.226
31	Fondation	Semelle filante	GJ@L intérieur	-	1200	16626	300	5985360000	1	5985360000	5.985
32	Fondation	Semelle filante	X1.6@X3+ intérieur	-	1200	13632	300	4907520000	1	4907520000	4.908
33	Fondation	Semelle filante	L+@LK	-	1200	4565	400	2191200000	1	2191200000	2.191
34	Fondation	Semelle filante	LK@KJ	-	1200	6475	400	3108000000	1	3108000000	3.108
35	Fondation	Semelle filante	KJ@G+	-	3000	12039	400	14446800000	1	14446800000	14.447
36	Fondation	Semelle filante	G+@GF	-	1200	4272	300	1537920000	1	1537920000	1.538
37	Fondation	Semelle filante	GF@ED	-	2500	9200	300	6900000000	1	6900000000	6.900
38	Fondation	Semelle filante	ED@DC	-	1200	7000	300	2520000000	1	2520000000	2.520
39	Fondation	Semelle filante	DC@BA	-	2500	9200	300	6900000000	1	6900000000	6.900
40	Fondation	Semelle filante	BA@A*	-	1200	5085	300	1830600000	1	1830600000	1.831
41	Fondation	Semelle filante	3+@1+	-	1200	19190	300	6908400000	1	6908400000	6.908
42	Fondation	Semelle filante	A*@1	-	600	5545	300	998100000	1	998100000	0.998
43	Fondation	Semelle filante	G@K5L extérieur	-	2000	16437	250	8218500000	1	8218500000	8.219
44	Fondation	Semelle filante	K5L@L+ extérieur	-	600	4504	250	675600000	1	675600000	0.676
45	Fondation	Semelle filante	K5L@L+ intérieur	-	600	3519	250	527850000	1	527850000	0.528

Tableau Annexe 14 Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 10

45	Fondation	Semelle filante	K5L@L+ intérieur	-	600	3519	250	527850000	1	527850000	0.528
46	Fondation	Semelle filante	X1+@x1.6+ extérieur	-	600	7498	250	1124700000	1	1124700000	1.125
47	Fondation	Semelle filante	X1+@x1.6+ intérieur	-	600	5762	250	864300000	1	864300000	0.864
48	Fondation	Semelle filante	L@L+ double	-	600	2400	250	360000000	1	360000000	0.360
49	Fondation	Semelle filante	L@L+ double	-	600	1200	250	180000000	1	180000000	0.180
50	Fondation	Semelle filante	X1.6@X2.5 extérieur	-	600	7345	250	1101750000	1	1101750000	1.102
51	Fondation	Semelle filante	X1.6@X2.5 central	-	700	5220	250	913500000	1	913500000	0.914
52	Fondation	Semelle filante	X1.6@X2.5 intérieur	-	600	7937	250	1190550000	1	1190550000	1.191
53	Fondation	Semelle filante	X2.5@X2.6 double	-	600	2800	250	420000000	1	420000000	0.420
54	Fondation	Semelle filante	X2.5@X2.6 double	-	600	1600	250	240000000	1	240000000	0.240
55	Fondation	Semelle filante	X2.5/X2.6@X3+ extérieur	-	600	6782	250	1017300000	1	1017300000	1.017
56	Fondation	Semelle filante	X2.5/X2.6@X3+ intérieur	-	600	5182	250	777300000	1	777300000	0.777
57	Fondation	Semelle filante	L@L+ extérieur	-	600	3791	250	568650000	1	568650000	0.569
58	Fondation	Semelle filante	L@L+ intérieur	-	600	2791	250	418650000	1	418650000	0.419
59	Fondation	Semelle filante	X3+ épais	-	900	1400	250	315000000	1	315000000	0.315
60	Fondation	Semelle filante	L+@KL	-	2000	8475	250	4237500000	1	4237500000	4.238
61	Fondation	Semelle filante	X1@ X3+ séparateur intérieur #1	-	1200	4850	300	1746000000	1	1746000000	1.746
62	Fondation	Semelle filante	X1@ X3+ séparateur intérieur #2	-	2620	5900	300	4637400000	1	4637400000	4.637
63	Fondation	Semelle filante	X1@ X3+ séparateur intérieur #3	-	2500	4300	400	4300000000	1	4300000000	4.300
64	Fondation	Semelle filante	X1@ X3+ séparateur intérieur #4	-	4389	5030	300	6623001000	1	6623001000	6.623
65	Fondation	Poutre	P1	-	400	3930	150	235800000	1	235800000	0.236
66	Fondation	Poutre	P2	-	400	3435	150	206100000	1	206100000	0.206
67	Fondation	Poutre	P3	-	400	1680	150	100800000	1	100800000	0.101
68	Fondation	Poutre	P4	-	400	4347	350	608580000	1	608580000	0.609
69	Fondation	Poutre	P5	-	400	1335	75	400500000	1	400500000	0.040
70	Fondation	Poutre	P6	-	400	2755	75	826500000	1	826500000	0.083
71	Fondation	Poutre	P7	-	400	2760	150	165600000	1	165600000	0.166
72	Fondation	Poutre	P8	-	400	1680	150	100800000	1	100800000	0.101
73	Fondation	Poutre	P9	-	400	5057	350	707980000	1	707980000	0.708
74	Fondation	Poutre	P10	-	250	5400	75	101250000	1	101250000	0.101
75	Fondation	Poutre	P11	-	250	1335	75	25031250	1	25031250	0.025
76	Fondation	Poutre	P12	-	250	5400	150	202500000	1	202500000	0.203
77	Fondation	Poutre	P13	-	250	4389	150	164587500	1	164587500	0.165
78	Fondation	Poutre	P14	-	250	1930	150	72375000	1	72375000	0.072
79	Fondation	Poutre	P15	-	250	1955	150	73312500	1	73312500	0.073
80	Fondation	Poutre	P16	-	250	1930	150	72375000	1	72375000	0.072
81	Fondation	Poutre	P17	-	250	5115	250	319687500	1	319687500	0.320
82	Fondation	Poutre	P18	-	250	1335	400	133500000	1	133500000	0.134
83	Fondation	Mur fondation	A*@AB	-	200	5000	2125	2125000000	1	2125000000	2.125
84	Fondation	Mur fondation	AB@CD inférieur	-	770	6200	1075	5132050000	1	5132050000	5.132
85	Fondation	Mur fondation	AB@CD supérieur	-	200	6200	1050	1302000000	1	1302000000	1.302
86	Fondation	Mur fondation	CD@EF	-	200	15400	2125	6545000000	1	6545000000	6.545
87	Fondation	Mur fondation	EF@G inférieur	-	770	6221	3550	17005103500	1	17005103500	17.005
88	Fondation	Mur fondation	EF@G supérieur	-	200	6221	1050	1306410000	1	1306410000	1.306
89	Fondation	Mur fondation	G@I	-	200	1337	2125	568225000	1	568225000	0.568
90	Fondation	Mur fondation	GJ@L intérieur	-	250	16151	3900	15747225000	1	15747225000	15.747

Tableau Annexe 15. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 11

90	Fondation	Mur fondation	GJ@L intérieur	-	250	16151	3900	15747225000	1	15747225000	15.747
91	Fondation	Mur fondation	X1.6@X3	-	250	13061	3875	12652843750	1	12652843750	12.653
92	Fondation	Mur fondation	L+@LK	-	250	5990	3875	5802812500	1	5802812500	5.803
93	Fondation	Mur fondation	LK@K	-	250	1425	3875	1380468750	1	1380468750	1.380
94	Fondation	Mur fondation	LK@Jl inférieur	-	790	6200	9365	45869770000	1	45869770000	45.870
95	Fondation	Mur fondation	LK@Jl supérieur	-	200	6200	725	899000000	1	899000000	0.899
96	Fondation	Mur fondation	J@K inférieur	-	770	4600	3875	13725250000	1	13725250000	13.725
97	Fondation	Mur fondation	J@K supérieur	-	200	4600	725	667000000	1	667000000	0.667
98	Fondation	Mur fondation	I@G inférieur	-	770	5189	3900	15582567000	1	15582567000	15.583
99	Fondation	Mur fondation	I@G supérieur	-	200	5189	700	726460000	1	726460000	0.726
100	Fondation	Mur fondation	G@GF	-	200	6872	2125	2920600000	1	2920600000	2.921
101	Fondation	Mur fondation	GF@ED inférieur	-	770	6200	1075	5132050000	1	5132050000	5.132
102	Fondation	Mur fondation	GF@ED supérieur	-	200	6200	1050	1302000000	1	1302000000	1.302
103	Fondation	Mur fondation	ED@DC	-	200	10000	2125	4250000000	1	4250000000	4.250
104	Fondation	Mur fondation	DC@BA inférieur	-	770	6200	1075	5132050000	1	5132050000	5.132
105	Fondation	Mur fondation	DC@BA supérieur	-	200	6200	1050	1302000000	1	1302000000	1.302
106	Fondation	Mur fondation	BA@A*	-	200	5810	2125	2469250000	1	2469250000	2.469
107	Fondation	Mur fondation	1+@3+	-	200	18240	2125	7752000000	1	7752000000	7.752
108	Fondation	Mur fondation	A*@1+	-	200	5760	2025	2332800000	1	2332800000	2.333
109	Fondation	Mur fondation	X1@X2	-	250	8550	3900	8336250000	1	8336250000	8.336
110	Fondation	Mur fondation	intérieur #1 entre I et G	-	250	2330	4800	2796000000	1	2796000000	2.796
111	Fondation	Mur fondation	intérieur entre X2 et X2.5	-	250	3245	4800	3894000000	1	3894000000	3.894
112	Fondation	Mur fondation	intérieur #2 entre I et G	-	250	2000	4800	2400000000	1	2400000000	2.400
113	Fondation	Mur fondation	intérieur x2.5@X3	-	250	5180	3900	5050500000	1	5050500000	5.051
114	Fondation	Mur fondation	extérieur G@K5	-	300	16737	2320	11648952000	1	11648952000	11.649
115	Fondation	Mur fondation	extérieur X1+@X1	-	500	1200	1885	1131000000	1	1131000000	1.131
116	Fondation	Mur fondation	extérieur #1 K5@L+@X1.6	-	200	9281	1550	2877110000	1	2877110000	2.877
117	Fondation	Mur fondation	extérieur #2 K5@L+@X1.6	-	200	12300	1935	4760100000	1	4760100000	4.760
118	Fondation	Mur fondation	extérieur #3 double	-	200	1200	1885	452400000	1	452400000	0.452
119	Fondation	Mur fondation	extérieur #3 double	-	200	2400	1885	904800000	1	904800000	0.905
120	Fondation	Mur fondation	intérieur #1 X1.6@X2.6	-	200	7937	1550	2460470000	1	2460470000	2.460
121	Fondation	Mur fondation	intérieur centrale #1 X1.6@X2.6	-	300	5520	1550	2566800000	1	2566800000	2.567
122	Fondation	Mur fondation	extérieur #1 X1.6@X2.6	-	200	7345	2220	3261180000	1	3261180000	3.261
123	Fondation	Mur fondation	extérieur #4 double	-	200	2400	1885	904800000	1	904800000	0.905
124	Fondation	Mur fondation	extérieur #5 double	-	200	1200	1885	452400000	1	452400000	0.452
125	Fondation	Mur fondation	intérieur X2.5@X3+	-	200	4782	1550	1482420000	1	1482420000	1.482
126	Fondation	Mur fondation	intérieur L+@L	-	200	2391	1550	741210000	1	741210000	0.741
127	Fondation	Mur fondation	extérieur X2.5@X3+	-	200	5982	1935	2315034000	1	2315034000	2.315
128	Fondation	Mur fondation	extérieur L+@L	-	200	3591	1935	1389717000	1	1389717000	1.390
129	Fondation	Mur fondation	intérieur double X3@X3+	-	500	1200	1935	1161000000	1	1161000000	1.161
130	Fondation	Mur fondation	extérieur L+@KL	-	300	7575	2320	5272200000	1	5272200000	5.272
131	Fondation	Mur fondation	extérieur X3@X3+	-	300	2160	2320	1503360000	1	1503360000	1.503
132	Fondation	Mur fondation	Muret X2.2@X2.8	-	200	3045	300	182700000	1	182700000	0.183
133	Fondation	Mur fondation	Muret X1.6@X2	-	200	6960	1200	1670400000	1	1670400000	1.670
134	Fondation	Mur fondation	Muret X2.2@X2.8	-	200	4015	1100	883300000	1	883300000	0.883
135	Fondation	Mur fondation	Muret X2.2@X2.8	-	200	3000	1100	660000000	1	660000000	0.660
136	Fondation	Mur fondation	Muret X2.2@X2.8	-	250	10535	1100	2897125000	1	2897125000	2.897
137	Étage	Dalle béton	Plancher de l'étage	989248170	-	-	125	1.23656E+11	1	1.23656E+11	123.656
138	Sous sol	Dalle sur sol	G@L	274107436	-	-	150	41116115429	1	41116115429	41.116
139	RDC	Dalle structurale	L@G et x1@x3	115378917	-	-	150	17306837613	1	17306837613	17.307
140	RDC	Dalle structurale	L@G et x1@x3	158728519	-	-	125	19841064875	1	19841064875	19.841
141	RDC	Dalle sur sol	A@G et 1@3	636085663	-	-	125	79510707844	1	79510707844	79.511
TOTAL										705	

ARMATURE COLONNE

Tableau Annexe 16. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 12

Niveau	Type de colonne	Armatures verticales				Cadres				Épingle			Goujon				Total par colonne			Total			
		Nombre	diamètre (mm)	longueur (mm)	Volume (mm ³)	diamètre (mm)	longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	diamètre (mm)	longueur (mm)	espacement (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	diamètre (mm)	longueur (mm)	Nombre	Volume (mm ³)	Volume (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse (kg)	Nombre de colonne	Masse totale (kg)
A	1	6	19.5	500	895943	11.3	1480	3	445276	11.3	320	250	3	96276	19.5	1245	6	2230898	0.004	7850	28.797	7	202
A	2	9	19.5	1050	2822220	11.3	1226	5	614762					0	19.5	1245	12	4461796	0.008	7850	62.005	4	248
		3	19.5	2075	1890882	11.3	2220	5	1113191					0			0	0.003	7850	23.332	98		
A	3 empattement à EL. 6100	11	19.5	3500	11497935	11.3	3170	15	4768670					0	19.5	1245	16	5949061	0.022	7850	174.393	1	174
		5	19.5	4550	6794234	11.3	2490	15	3745738					0			0	0.011	7850	82.739	83		
					0	11.3	2446	15	3679548					0			0	0.004	7850	28.884	29		
A	3 empattement à EL. 8575	11	19.5	1050	3449380	11.3	3170	5	1589557					0	19.5	1245	16	5949061	0.011	7850	86.256	6	518
		5	19.5	2075	3098469	11.3	2490	5	1248579					0			0	0.004	7850	34.124	205		
					0	11.3	2446	5	1226516					0			0	0.000	7850	0.000	0		
A	4	4	19.5	1025	1224455	11.3	1330	5	666912					0	19.5	1245	6	2230898	0.004	7850	32.360	4	129
		2	19.5	2075	1239388				0				0			0	0.001	7850	9.729	39			
					0				0					0			0	0.000	7850	0.000	0		
A	5	6	19.5	1050	1881480	11.3	2520	5	1263622					0	19.5	1245	14	5205429	0.008	7850	65.552	1	144
		8	19.5	2075	4957551	11.3	1932	5	968777					0			0	0.006	7850	46.522	60		
					0	11.3	1540	5	772214					0			0	0.001	7850	6.062	58		
B	6	9	19.5	3908	10504035	11.3	2870	4	1151300	11.3	1690		4	677943	19.5	1245	16	5949061	0.018	7850	143.516	1	144
		5	19.5	3850	5748967	11.3	1174	16	1883800					0			0	0.008	7850	59.917	60		
		2	19.5	3500	2090534	11.3	2070	16	3321522					0			0	0.005	7850	42.485	42		
B	7	9	19.5	3908	10504035	11.3	4830	4	1937554					0	19.5	1245	23	8551776	0.021	7850	164.798	1	165
		3	19.5	3600	3225395	11.3	3630	13	4732567					0			0	0.008	7850	62.470	62		
		3	19.5	3825	3426982	11.3	2906	13	3788651					0			0	0.007	7850	56.643	57		
		8	19.5	4550	10870775				0					0			0	0.011	7850	85.336	85		
B	8	5	19.5	4550	6794234	11.3	3170	13	4132848					0	19.5	1345	16	6426897	0.017	7850	136.229	1	136
		11	19.5	3850	12647728	11.3	2476	13	3228054					0			0	0.016	7850	124.625	125		
					0	11.3	2428	13	3165474					0			0	0.003	7850	24.849	25		
					0				0					0			0	0.000	7850	0.000	0		
B	9	5	19.5	4550	6794234	11.3	3170	13	4132848					0	19.5	1345	16	6426897	0.017	7850	136.229	1	136
		11	19.5	3850	12647728	11.3	2476	13	3228054					0			0	0.016	7850	124.625	125		

Tableau Annexe 17. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 13

B	9	5	19.5	4550	6794234	11.3	3170	13	4132848					0	19.5	1345	16	6426897	0.017	7850	136.229	1	136
		11	19.5	3850	12647728	11.3	2476	13	3228054					0			0	0.016	7850	124.625	125		
					0	11.3	2428	13	3165474					0			0	0.003	7850	24.849	25		
					0				0					0			0	0.000	7850	0.000	0		
B	10	6	19.5	4550	8153081	11.3	3103	13	4045497					0	19.5	1345	16	6426897	0.019	7850	146.210	1	146
		10	19.5	3850	11497935	11.3	2241	13	2921675					0			0	0.014	7850	113.194	113		
					0	11.3	2422	13	3157652					0			0	0.003	7850	24.788	25		
B	11	9	19.5	3908	10504035	11.3	1464	16	2349134					0	19.5	1245	14	5205429	0.018	7850	141.760	2	284
		5	19.5	3850	5748967	11.3	2060	16	3305476					0			0	0.009	7850	71.077	142		
					0	11.3	3270	16	5247042					0			0	0.005	7850	41.189	82		
B	12	7	19.5	3883	8117542	11.3	2056	16	3299057					0	19.5	1245	17	6320878	0.018	7850	139.239	1	139
		10	19.5	3850	11497935	11.3	1806	16	2897907					0			0	0.014	7850	113.007	113		
					0	11.3	2761	16	4430300					0			0	0.004	7850	34.778	35		
B	13	9	19.5	3883	10436839	11.3	3570	4	1432105					0	19.5	1245	14	5205429	0.017	7850	134.094	1	134
		5	19.5	3850	5748967	11.3	1422	16	2281741					0			0	0.008	7850	63.041	63		
					0	11.3	2450	16	3931270					0			0	0.004	7850	30.860	31		
B	13	9	19.5	3908	10504035	11.3	3570	4	1432105					0	19.5	1245	14	5205429	0.017	7850	134.561	1	135
		5	19.5	3850	5748967	11.3	1422	16	2281741					0			0	0.008	7850	63.041	63		
					0	11.3	2450	16	3931270					0			0	0.004	7850	30.860	31		

Tableau Annexe 18. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 14

B	13	9	19.5	3908	10504035	11.3	3570	4	1432105	0	19.5	1245	14	5205429	0.017	7850	134.561	1	135			
		5	19.5	3850	5748967	11.3	1422	16	2281741	0	0.008	7850	63.041	63								
		0	11.3	2450	16	3931270	0	0.004	7850	30.860	0	0.000	7850	0								
B	14	12	19.5	3908	14005380	11.3	3470	4	1391990	0	19.5	1245	17	6320878	0.022	7850	170.488	1	170			
		5	19.5	3850	5748967	11.3	3100	16	4974260	0	0.011	7850	84.177	84								
		0	11.3	2350	16	3770810	0	0.004	7850	29.601	0	0.003	7850	26.326								
B	15	6	19.5	3933	7047487	11.3	1480	14	2079957	11.3	330	14	449288	19.5	1245	6	2230898	0.012	7850	92.674	2	185
		0	11.3	3080	4	1235542	0	0.001	7850	9.699	0	0.000	7850	0.000								
		0	11.3	3080	4	1235542	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000								
B	16	7	19.5	4834	10105639	11.3	2280	17	3887143	11.3	520	17	886541	19.5	1245	12	4461796	0.019	7850	151.828	1	152
		5	19.5	4750	7092882	11.3	3080	4	1235542	11.3	520	17	886541	0.009	7850	72.337	72					
		0	11.3	3080	4	1235542	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000								
B	17	8	19.5	3950	9437266	11.3	1480	16	2374808	11.3	520	16	834392	19.5	1245	8	2974531	0.016	7850	122.625	5	613
		0	11.3	520	16	834392	0	0.001	7850	6.590	0	0.000	7850	0.000								
		0	11.3	520	16	834392	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000								
B	18	8	19.5	0	0	11.3	320	0	0	11.3	220	0	0	19.5	1345	8	3213449	0.003	7850	25.226	1	25
		11	19.5	3500	11487935	11.3	3170	15	4768670	0	19.5	1245	16	5949061	0.022	7850	174.393	174				
		5	19.5	4550	6794234	11.3	2490	15	3745738	0	0.011	7850	82.739	83								
A	19	0	11.3	2446	15	3679548	0	0.004	7850	28.884	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000	1	29		
		0	11.3	270	0	0	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000								
		0	11.3	270	0	0	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000								
B	20	4	25.2	0	11.3	270	0	0	0	0.000	7850	0.000	0	0.000	7850	0.000	3	0				
																		Total	6417			

ARMATURE MUR

Tableau Annexe 19. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 15

no	1	2	3	4					5					6					19	20
				Armature horizontale					Armature verticale					Goujons						
	Niveau	Type d'élément	Type	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre
1	Fondation	Mur	Axe A@A* / 1@1.3	3050	6	15M	16	3679433	1175	1	15M	16	236248						1220	13
2				3050	5	15M	16	3066194	2065	1	15M	16	415193						1220	2
3									1475	8	15M	16	2372531						2100	11
4									2065	1	15M	16	415193							
5									1175	9	15M	16	2126230							
6	Fondation	Mur	Axe A@A* / 1.4@2						2075	20	15M	16	8344070							
7									1175	20	15M	16	4724955							
8	Fondation	Mur	Axe A@A* / 2@2.5						2075	14	15M	16	5840849							
9									1175	14	15M	16	3307469							
10	Fondation	Mur	Axe A@A* / 2.5@3+						2075	16	15M	16	6675256						1220	13
11									1175	16	15M	16	3779964							
12	Fondation	Mur	Axe A@A* / 1+@3+	8992	9	15M	16	16271540												
13				6838	9	15M	16	12373753												
14				8992	5	15M	16	9039744												
15				6838	5	15M	16	6874307												
16	Fondation	Mur	Axe 1 / A@B	5860	10	15M	16	11782229	2075	17	15M	16	7092460							
17				5860	4	15M	16	4712892	1175	17	15M	16	4016212							
18				8992	2	15M	16	3615898												
19				7361	1	15M	16	1480017												
20	Fondation	Mur	Axe 1 / B@C	6115	4	15M	16	4917975	2075	17	15M	16	7092460							
21				6115	4	25M	16	4917975	1025	17	15M	16	3503504							
22				6115	6	15M	16	7376962												
23				6115	4	25M	25.2	12199651												
24	Fondation	Mur	Axe 1 / C@D	5860	10	15M	16	11782229	2075	17	15M	16	7092460							
25				5860	4	15M	16	4712892	1175	17	15M	16	4016212							
26	Fondation	Mur	Axe 1 / D@E	5860	10	15M	16	11782229	2075	17	15M	16	7092460							
27				5860	4	15M	16	4712892	1175	17	15M	16	4016212							
28	Fondation	Mur	Axe 1 / E@F	3285	3	15M	16	1981465	2075	7	15M	16	2920425							
29				2198	3	15M	16	1325802	1175	7	15M	16	1653734							
30				1110	3	15M	16	669536	2900	4	15M	16	2332318							
31				5860	10	15M	16	11782229	2000	4	15M	16	1608495							
32				5860	4	15M	16	4712892	3725	3	15M	16	2246867							
33									2825	3	15M	16	1704000							
34									3650	2	15M	16	1467752							
35									4550	2	15M	16	1829664							
36	Fondation	Mur	Axe 1 / F@G+	6122	11	15M	16	13539912	4550	19	15M	16	17381804							
37				9832	3	15M	16	5930523	3500	19	15M	16	13370618							
38				8744	3	15M	16	5274257												

Tableau Annexe 20. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 16

	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42 n0	
1	Coin			Châpeaux					Équerres					Étriers					Volume total (mm ³)	Volume total (m ³)	Densité (kg/m ³)	Masse totale (kg)	1
2	Type	diamètre	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)	Longueur (mm)	Nombre	Type	Diamètre (mm)	Volume (mm ³)					2
3	15M	16	3188842																7104523	0.007	7850	56	3
4	15M	16	490591																3971978	0.004	7850	31	4
5	15M	16	4644531																7017061	0.007	7850	55	5
6																			415193	0.000	7850	3	6
7																			2126230	0.002	7850	17	7
8																			8344070	0.008	7850	66	8
9																			4724955	0.005	7850	37	9
10																			5840849	0.006	7850	46	10
11																			3307469	0.003	7850	26	11
12	15M	16	3188842																9864098	0.010	7850	77	12
13																			3779964	0.004	7850	30	13
14																			16271540	0.016	7850	128	14
15																			12373753	0.012	7850	97	15
16																			9039744	0.009	7850	71	16
17																			6874307	0.007	7850	54	17
18																			18874689	0.019	7850	148	18
19																			8729104	0.009	7850	69	19
20																			3615898	0.004	7850	28	20
21																			1480017	0.001	7850	12	21
22				1170	17	15M	16	3999122											16009556	0.016	7850	126	22
23																			8421479	0.008	7850	66	23
24																			7376962	0.007	7850	58	24
25																			12199651	0.012	7850	96	25
26																			18874689	0.019	7850	148	26
27																			8729104	0.009	7850	69	27
28																			18874689	0.019	7850	148	28
29																			8729104	0.009	7850	69	29
30																			4901890	0.005	7850	38	30
31																			2979537	0.003	7850	23	31
32																			3001855	0.003	7850	24	32
33																			13390725	0.013	7850	105	33
34																			6959759	0.007	7850	55	34
35																			1704000	0.002	7850	13	35
36																			1467752	0.001	7850	12	36
37																			1829664	0.002	7850	14	37
38				1170	19	15M	16	4469607	3250	3	15M	16	1960354						37351677	0.037	7850	293	38
39																			19301141	0.019	7850	152	39
40																			5274257	0.005	7850	41	40

Tableau Annexe 22. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 18

40																			5274257	0.005	7850	41	40
41																			3077856	0.003	7850	24	41
42																			18320425	0.018	7850	144	42
43																			18320425	0.018	7850	144	43
44																			4923605	0.005	7850	39	44
45																			3860389	0.004	7850	30	45
46																			26006355	0.026	7850	204	46
47																			11720503	0.012	7850	92	47
48				1170	16 15M	16	3763879												17670931	0.018	7850	139	48
49																			21236788	0.021	7850	167	49
50																			10847693	0.011	7850	85	50
51																			17939373	0.018	7850	141	51
52																			25171948	0.025	7850	198	52
53																			11248008	0.011	7850	88	53
54																			25171948	0.025	7850	198	54
55																			11248008	0.011	7850	88	55
56																			9039744	0.009	7850	71	56
57																			2998839	0.003	7850	24	57
58				1170	16 15M	16	3763879												17670931	0.018	7850	139	58
59																			21236788	0.021	7850	167	59
60																			10847693	0.011	7850	85	60
61																			17939373	0.018	7850	141	61
62								3250	3 15M	16	1960354								13538505	0.014	7850	106	62
63																			8638626	0.009	7850	68	63
64																			6370944	0.006	7850	50	64
65																			5903178	0.006	7850	46	65
66																			19662851	0.020	7850	154	66
67																			9430408	0.009	7850	74	67
68																			9148318	0.009	7850	72	68
69																			7338760	0.007	7850	58	69
70								1800	42 20M	19.5	2257762								220405550	0.220	7850	1730	70
71																			10561381	0.011	7850	83	71
72								1800	33 20M	19.5	17739671								194378407	0.194	7850	1526	72
73																			10561381	0.011	7850	83	73
74	15M	16	6377684					1800	21 20M	19.5	11288881								73982273	0.074	7850	581	74
75	15M	16	7720778					1800	8 20M	19.5	4300526								51157349	0.051	7850	402	75
76	15M	16	7849458					1800	7 20M	19.5	3762960								76095367	0.076	7850	597	76
77	15M	16	6377684					1800	3 20M	19.5	1612697								16992341	0.017	7850	133	77
78								1800	18 20M	19.5	9676184								53119580	0.053	7850	417	78
79	15M	16	6622980	1270	13 15M	16	3319532												49406678	0.049	7850	388	79
80	25M	25.2	4867890																39186768	0.039	7850	308	80

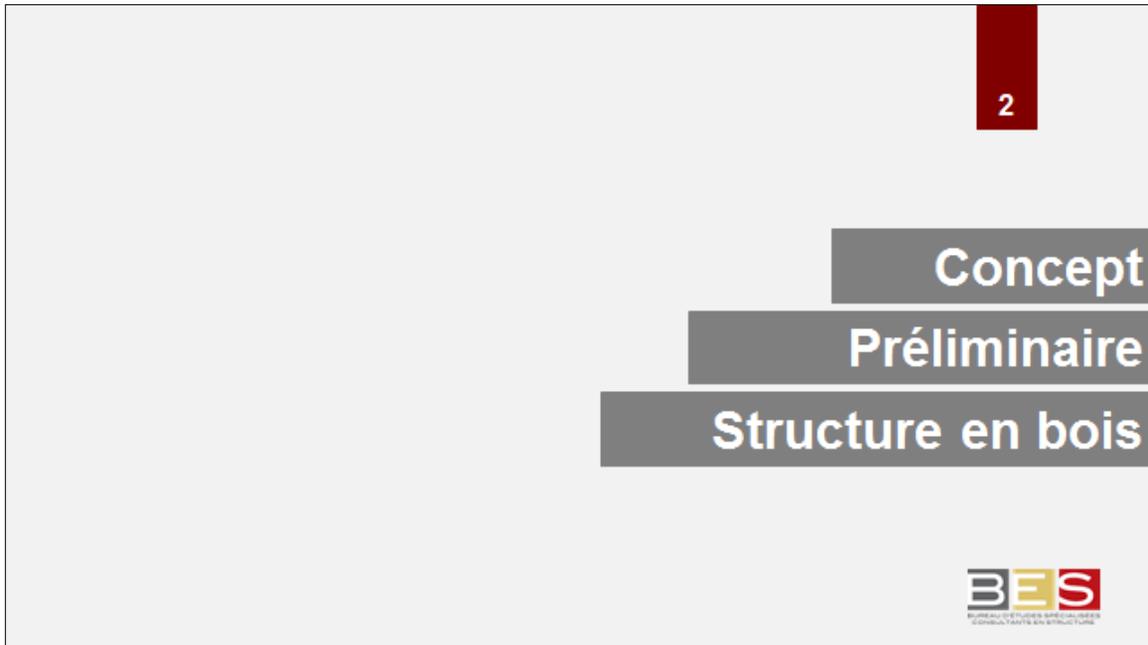
Tableau Annexe 23. Détails inventaires pour béton et armatures – Partie 19

80			Axe X3 / G@L	9144	3 15M	16	5515531	3850	15 25M	25.2	28803347			4880	2	80
81				8992	3 15M	16	5423847									81
82				9144	3 15M	16	5515531									82
83				8992	2 15M	16	3615898									83
84				4170	2 15M	16	1676856									84
85				8992	8 15M	16	14463591									85
86				9144	3 15M	16	5515531									86
87				4794	12 25M	25.2	28692622									87
88				4764	11 15M	16	10536449									88
89				6620	8 15M	16	10648240									89
90				6620	11 15M	16	14641330									90
91				6100	6 25M	25.2	18254589									91
92				6100	3 15M	16	3679433									92
93				3598	2 15M	16	1446842									93
94				6100	6 25M	25.2	18254589									94
95				6100	7 15M	16	8585344									95
96				2740	8 15M	16	4407278									96
97				2312	4 15M	16	1859421									97
98				1003	4 15M	16	806660									98
99				4600	1 15M	16	924885									99
100				6500	10 15M	16	13069025									100
101				2312	4 15M	16	1859421									101
102				6500	12 15M	16	15682831									102
103				3100	12 15M	16	7479504									103
104				1700	8 15M	16	2734442									104
105				3100	6 15M	16	3739752									105
106	Fondation	Mur	Axe X3 / I@J					4550	23 25M	25.2	52195155					106
107								3850	23 25M	25.2	44165132					107
108	Fondation	Mur	Axe X3 / J@K					4550	15 20M	19.5	20382702					108
109								3825	15 20M	19.5	17134909					109
110								3095	7 15M	16	4356007					110
111	Fondation	Mur	Axe X3 / K@L+					4550	13 20M	19.5	17665009					111
112								3825	13 20M	19.5	14850254					112
113								1475	6 20M	19.5	2643032					113
114								1455	6 20M	19.5	2607194					114
115								3850	10 20M	19.5	11497935					115
116								3825	10 20M	19.5	11423273					116
117								1800	2 15M	16	723823					117
118								1800	2 15M	16	723823					118
119								2250	7 20M	19.5	4703701					119
120								2150	7 15M	16	3025982					120

Tableau Annexe 28. Détails inventaires des luminaires

Luminaire									
Type	Niveau	Montage	Source	Nombre luminaire	Nombre tube	Total	Référence	Page	
	Extérieur	Lampadaire		3			3 1-Releve_Mis E002		
F1	RDC	surface	Fluo (T8)	97			97 1-Releve_Mis E004		
F1	2e Étage	surface	Fluo (T8)	96			96 1-Releve_Mis E004		
F2	RDC	suspendu	Fluo (T8)	12			12 1-Releve_Mis E004		
F2	2e Étage	suspendu	Fluo (T8)	17			17 1-Releve_Mis E004		
F3	2e Étage	suspendu	Fluo (T8)	29	2		58 1-Releve_Mis E004		
F4	RDC	surface	Fluo (T8)	8	2		16 1-Releve_Mis E004		
F5	RDC	encastré	Fluo (T8)	Apparaît dans la coupe B comme F1, m		Apparaît dans la cou	1-Releve_Mis E004		
F5	2e Étage	encastré	Fluo (T8)	Apparaît dans la coupe B comme F6, m		Apparaît dans la cou	1-Releve_Mis E004		
F6	RDC	encastré	Fluo (T8)	11	2		22 1-Releve_Mis E004		
F6	2e Étage	encastré	Fluo (T8)	61	2		122 1-Releve_Mis E004		
F7	Sous-sol	surface	Fluo (T8)	2			2 1-Releve_Mis E003		
F7	RDC	surface	Fluo (T8)	5			5 1-Releve_Mis E004		
F7	2e Étage	surface	Fluo (T8)	6			6 1-Releve_Mis E004		
F8	Sous-sol	surface	Fluo (T8)	30	2		60 1-Releve_Mis E003		
F8	2e Étage	surface	Fluo (T8)	1	2		2 1-Releve_Mis E004		
F9	RDC	encastré	DEL	19			19 1-Releve_Mis E004		
F9	2e Étage	encastré	DEL	6			6 1-Releve_Mis E004		
F10	RDC	appliqué	Fluo (T8)	1			1 1-Releve_Mis E004		
F10	2e Étage	appliqué	Fluo (T8)	1			1 1-Releve_Mis E004		
A	RDC	encastré	DEL	15			15 1-Releve_Mis E004		
B	RDC	encastré	DEL	16			16 1-Releve_Mis E004		
B	2e Étage	encastré	DEL	1			1 1-Releve_Mis E004		
C	2e Étage	appliqué	DEL	18			18 1-Releve_Mis E004		
D	RDC (ext)	appliqué	M.H.	2			2 1-Releve_Mis E004		
E	RDC (ext)	encastré	M.H.	8			8 1-Releve_Mis E004		
F	Sous-sol	appliqué	Fluo	1			1 1-Releve_Mis E003		
G	2e Étage	encastré	M.H.	4			4 1-Releve_Mis E004		
U	RDC	surface	DEL	13			13 1-Releve_Mis E004; CE04; C		
U	2e Étage	surface	DEL	6			6 1-Releve_Mis E004; CE02; C		
U1	Sous-sol	surface	DEL	2			2 1-Releve_Mis E003		
U1	RDC	surface	DEL	4			4 1-Releve_Mis E004		
U2	Sous-sol	surface	DEL	7			7 1-Releve_Mis E003		
U2	RDC	surface	DEL	15			15 1-Releve_Mis E004		
U2	2e Étage	surface	DEL	10			10 1-Releve_Mis E004		
U3	Sous-sol	surface	DEL	2			2 1-Releve_Mis E003		
U3	RDC	surface	DEL	11			11 1-Releve_Mis E004		
U3	2e Étage	surface	DEL	3			3 1-Releve_Mis E004		
U6	2e Étage	appliqué	DEL	2			2 3-Releve_Mis CE02; CE03		
							685		

ANNEXE 4 – RECONCEPTION DE LA STRUCTURE



SOMMAIRE

3

- ❑ Objectifs
- ❑ Normes et charges de calcul
- ❑ Structure existante
- ❑ Conception



Objectifs

4

- Concept structural en bois d'ingénierie en respectant le plus possible les plans soumission en terme de:
 - Géométrie, système de contreventements et charges appliquées
- Concept préliminaire des assemblages et estimation des quantités



Normes

5

- Code National du Bâtiment (CNB) - Canada 2005 (modifié Québec)
- CSA O86 - Règles de calcul des charpentes en bois



Charges de calcul

6

Charges permanentes

- Charges révisées pour une structure en bois
- Modification des platelages et des membrures secondaires en éléments de bois
- Charges permanentes typique
 - Toit: 1.75 kPa
 - Étage: 2.25kPa (sans cloisons) / 3.25kPa (incluant les cloisons)



Charges de calcul

6

Charges permanentes

- Charges révisées pour une structure en bois
- Modification des platelages et des membrures secondaires en éléments de bois
- Charges permanentes typique
 - Toit: 1.75 kPa
 - Étage: 2.25kPa (sans cloisons) / 3.25kPa (incluant les cloisons)



Charges de calcul

7

Charges dues à l'usage

- Charges vives à l'étage
 - Zone de rayonnage: 7.2kPa
 - Zone de lecture: 2.9kPa



Charges de calcul

8

Charges de vent et de neige

- Pressions horaires pour Varennes, QC.
 - $q(1/50) : 0.40\text{kPa}$
 - $q(1/10) : 0.31\text{kPa}$
- Charge due à la neige
 - $S_s = 2.6\text{kPa}$ et $S_r = 0.4\text{kPa}$
 - Basée sur le coefficient de pente du CNB 2005



Combinaisons de charges

9

Combinaison de charges aux états limites ultimes

- 1.4D
 - 1.25D + 1.5L+ (0.5S ou 0.4W)
 - 1.25D + 1.5S+(0.5L ou 0.4W)
 - 1.25D + 1.4W+(0.5L ou 0.5S)
 - 0.9 D + (1.5 L ou 1.4 W ou 1.5 S)
- Facteur d'importance
- $I_s = 1,0$
 - $I_w = 1,0$



Combinaisons de charges

10

Combinaison de charges aux états limites de service

- $1.0D + 1.0L + 0.55$
- $(1.0L + 0.55)$ ou $(1.0S + 0.5L)$ ou W
- $1.0D + 1.0W$
- Facteur d'importance
 - $I_s = 0.9$
 - $I_s = 0.75$
- Critère de flèche: $\Delta_{li} \leq L/360$
- Limite de glissement inter-étage : $h/500$



Combinaisons de charges

11

Cas de chargement particulier

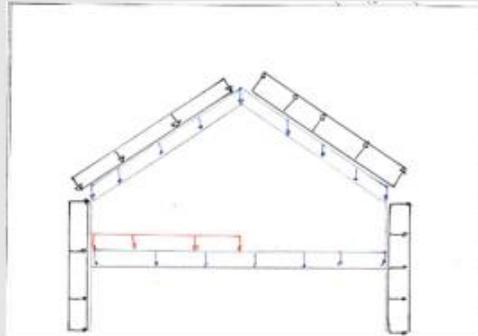
- Chargement partiel de la surcharge due à l'utilisation selon l'article 4.1.5.3
- Chargement partiel de la neige avec pondération majorée par 1.25 selon l'article 4.1.6.3 pour un toit à deux versants



Cas de charges

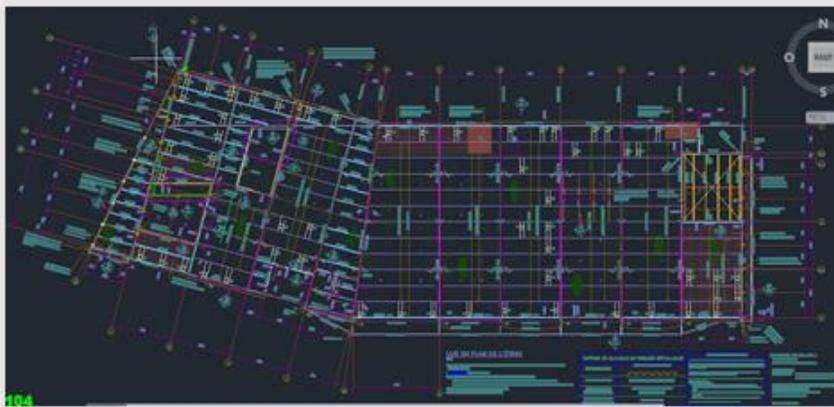
12

Ex:



Structure existante

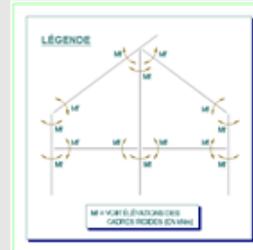
13



Structure existante

14

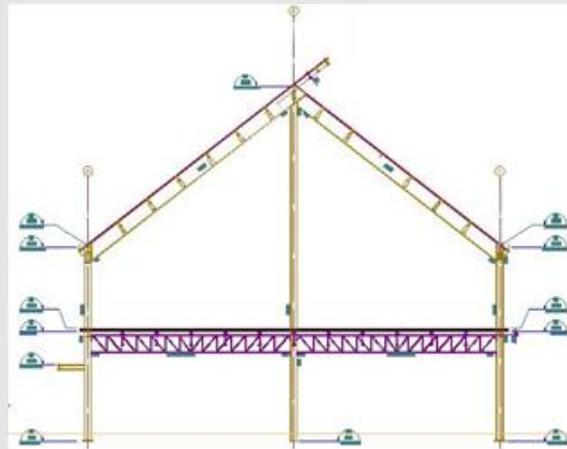
- Structure d'acier avec connections rigides
- Structure de toit et colonne en profilé d'acier de type W et étage en poutrelle d'acier
- Diaphragme en tôle d'acier avec dalle de béton



BES
BUREAU D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES
EN INGENIERIE ET ARCHITECTURE

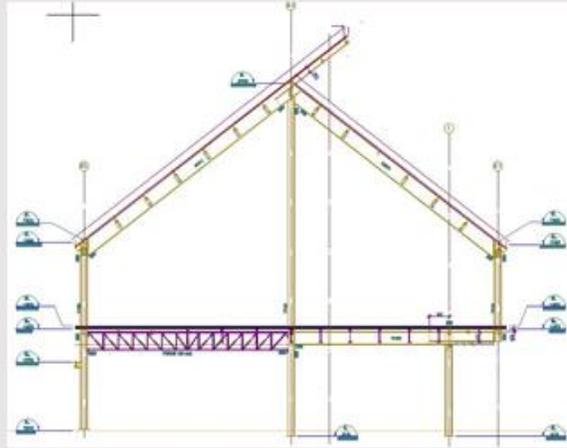
Cadre rigide typique, axes A à G

15



BES
BUREAU D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES
EN INGENIERIE ET ARCHITECTURE

Cadre rigide en porte-à-faux, axe J 16



Structure proposée

17

- Structure en bois lamellé-collé, SPF:
 - Poutres et colonnes : 20f-EX
 - Platelage : 20f-E

Méthodologie

18

Évaluation des intrants (données climatiques, géométrie, matériaux, etc.)

↓
Dimensionnement gravitaire des éléments structuraux

↓
Modélisation par éléments finis (SAP 2000)

↓
Analyse du comportement global du cadre rigide

- Rigidité, déformation latérale
- Interaction des éléments du cadre
- Sollicitations combinées

↓
Révision du dimensionnement des éléments (processus itératif)

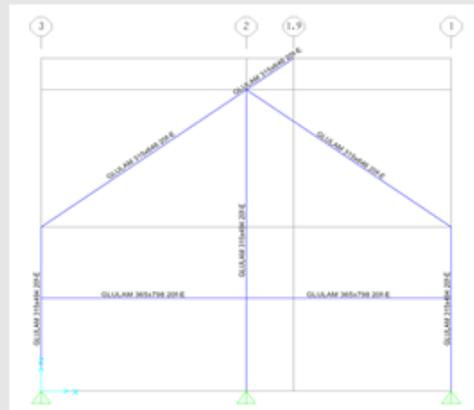


CONCEPT INITIAL

19

Dimensionnement selon les charges gravitaires

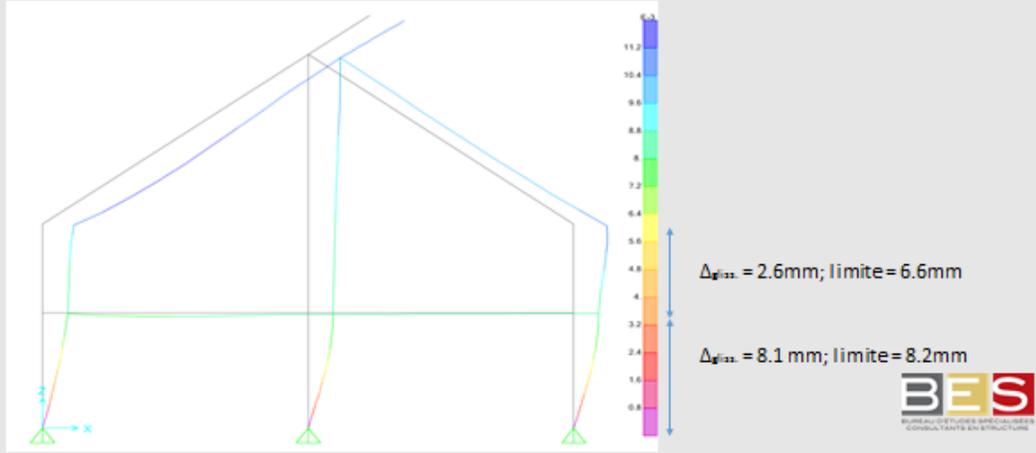
- Dimensionnement gravitaire avec Woodworks Sizer:
- Considération d'un cadre rigide similaire à la structure existante, avec transfert des moments au joints des éléments
- Dimensions des éléments ajustées pour satisfaire le critère de déformation latérale



CONCEPT INITIAL

20

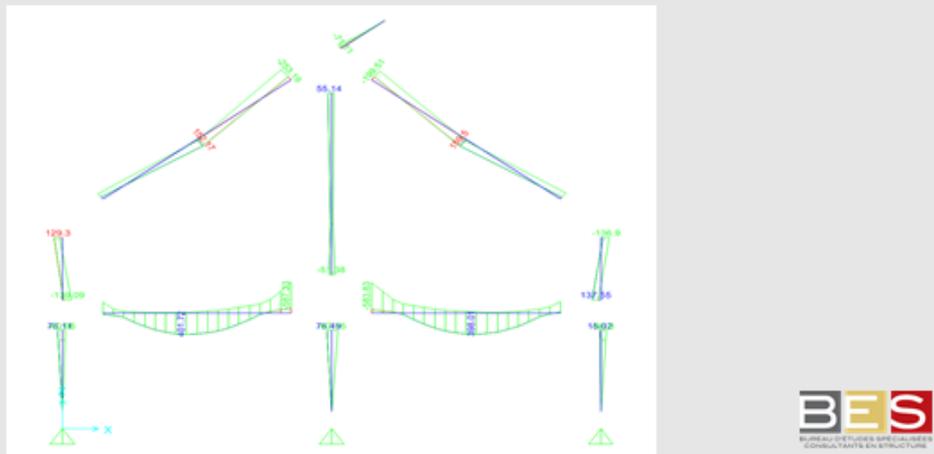
Déplacement latéral



CONCEPT INITIAL

21

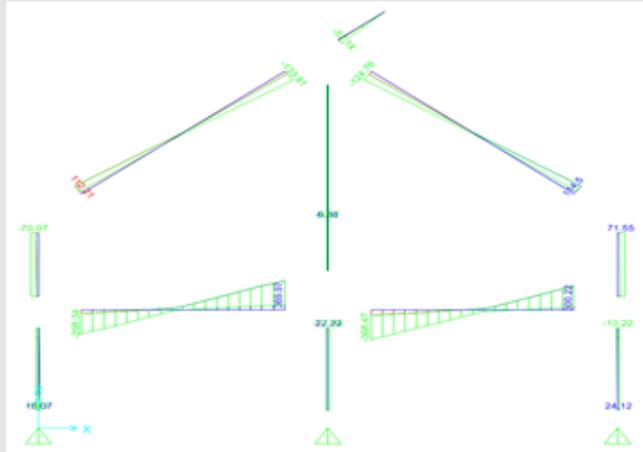
Enveloppe des moments



CONCEPT INITIAL

22

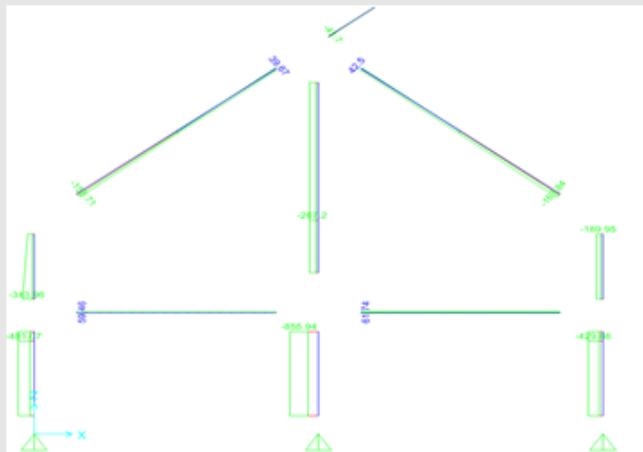
Enveloppe des efforts tranchants



CONCEPT INITIAL

23

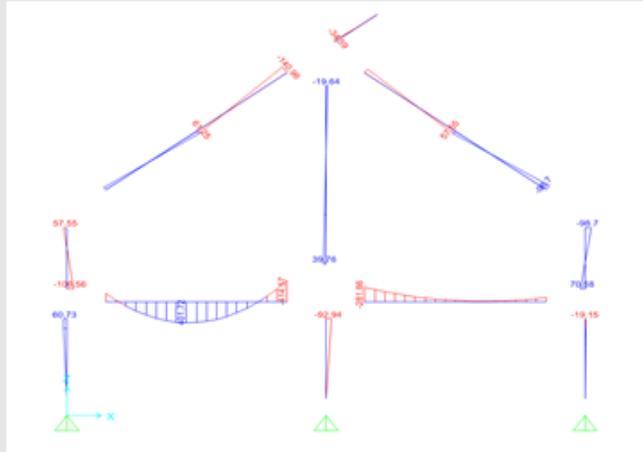
Enveloppe des charges axiales



CONCEPT INITIAL

24

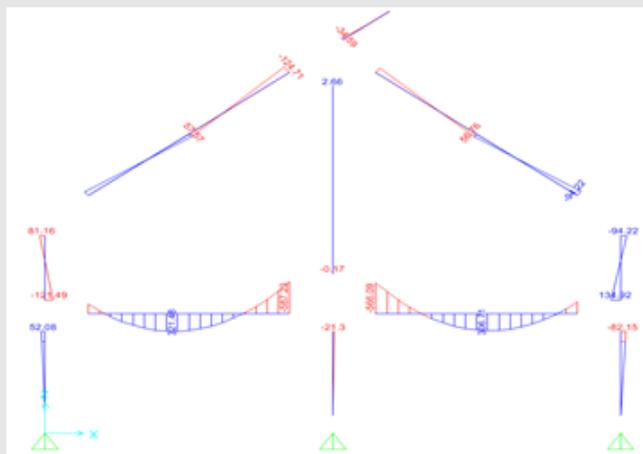
Cas : $1.25D + 1.5LL1 + 0.4WL1$ (Moment de flexion positif max)



CONCEPT INITIAL

25

Cas : $1.25D + 1.5LL + 0.4WL1$ (Moment de flexion négatif max)

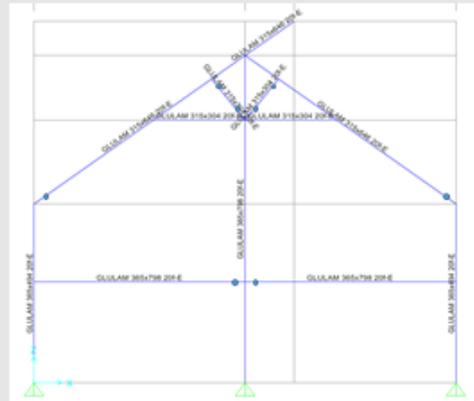


CONCEPT MODIFIÉ

26

Modification aux connections du cadre rigide

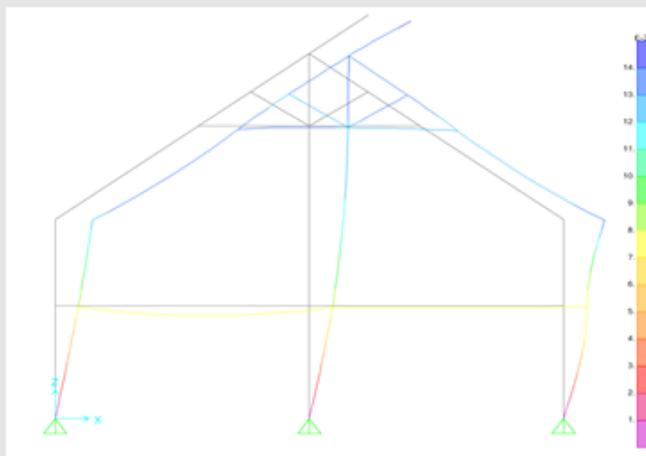
- Introduction de joints rotulés
- Ajout de membrures pour un assemblage de type ferme au sommet
- Éléments ré-évalués pour satisfaire le critère de déformation latérale et pour leurs efforts de sollicitation combinés



CONCEPT MODIFIÉ

27

Déplacement latéral



$\Delta_{l_{12}} = 6.0 \text{ mm}; \text{ limite} = 6.6 \text{ mm}$

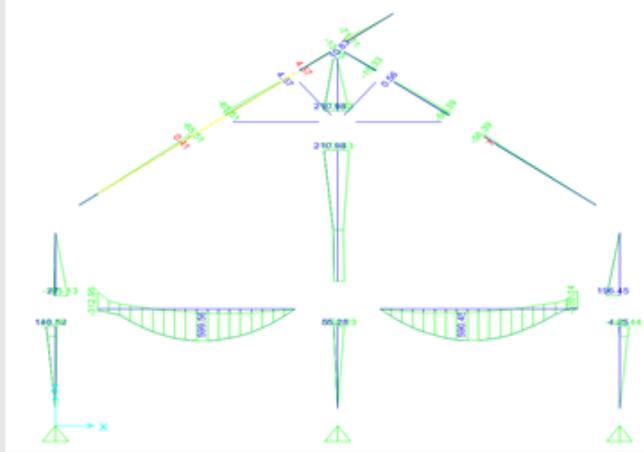
$\Delta_{l_{13}} = 7.8 \text{ mm}; \text{ limite} = 8.2 \text{ mm}$



CONCEPT MODIFIÉ

28

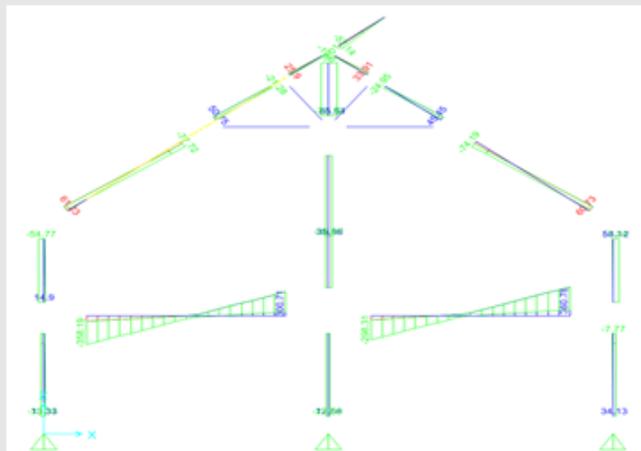
Enveloppe des moments



CONCEPT MODIFIÉ

29

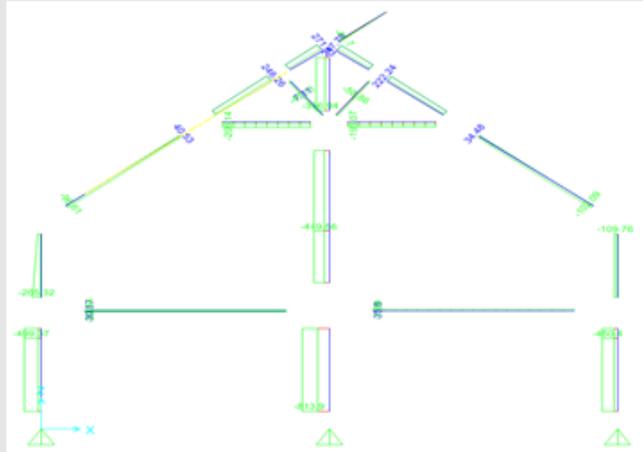
Enveloppe des efforts tranchants



CONCEPT MODIFIÉ

30

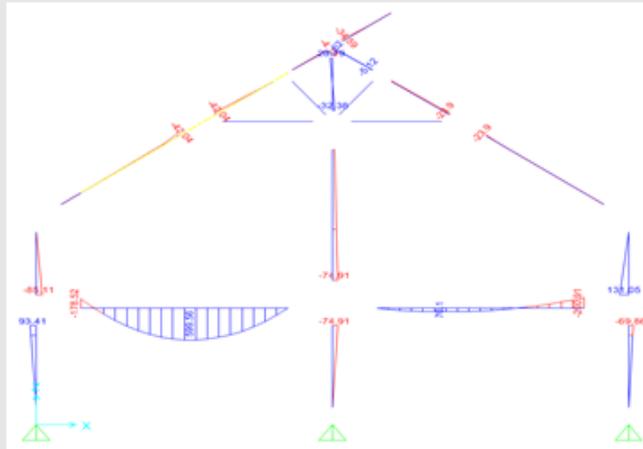
Enveloppe des charges axiales



CONCEPT MODIFIÉ

31

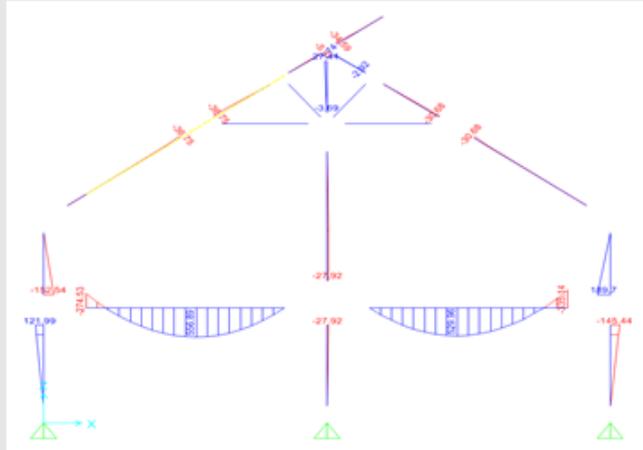
Cas : $1.25D + 1.5LL1 + 0.4WL1$ (Moment de flexion positif max)



CONCEPT MODIFIÉ

32

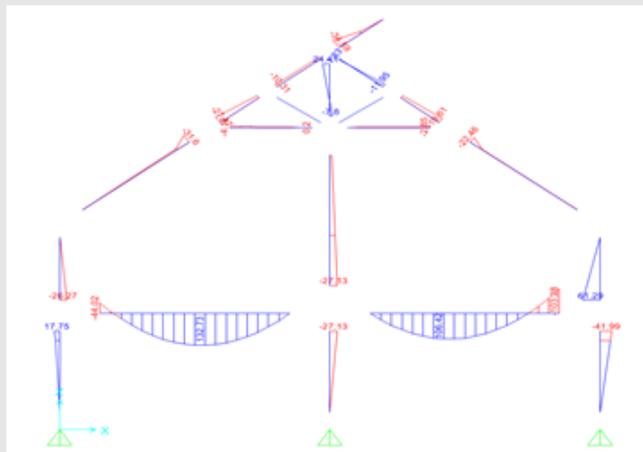
Cas : $1.25D + 1.5LL + 0.4WL1$ (Moment de flexion négatif max)



CONCEPT MODIFIÉ

33

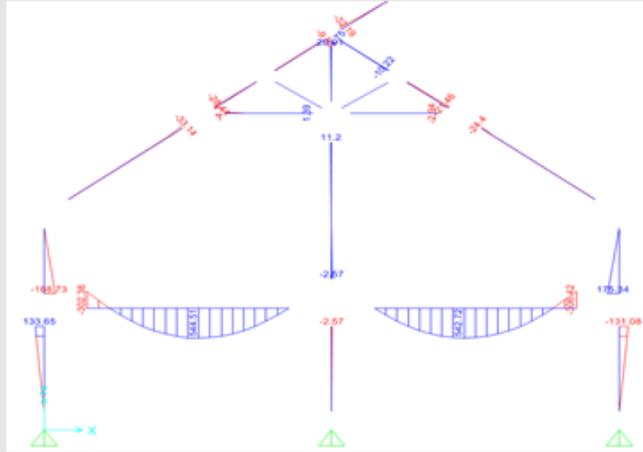
Cas : $1.25D + 0.4WL1$



CONCEPT MODIFIÉ

34

Cas : 1.25D + 1.5LL

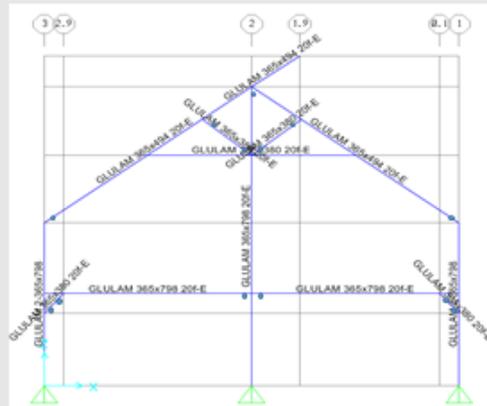


CONCEPT FINAL PROPOSÉ

35

Simplification des connections du cadre rigide

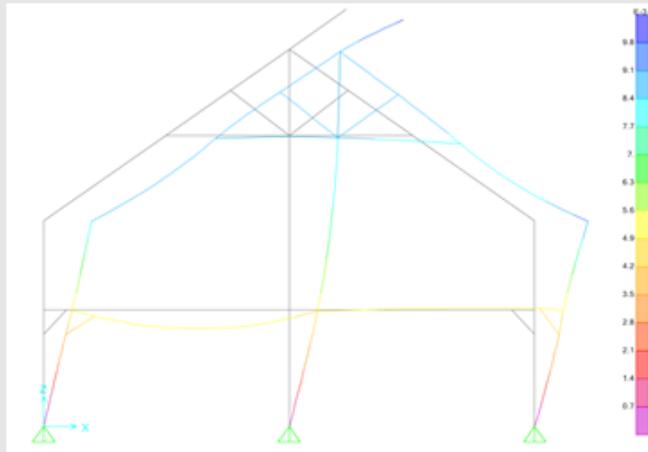
- Introduction de jambes de forces pour induire l'effet d'encastrement aux colonnes de rive
- Réduction des sections de toit
- Dimensionnement itératif afin de satisfaire la résistance aux sollicitations engendrées par les jambes de forces
- Conception gouvernée par le cisaillement induit dans les colonnes de rive



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

36

Déplacement latéral



$\Delta_{plaz} = 4.3\text{mm}$; limite = 6.6mm

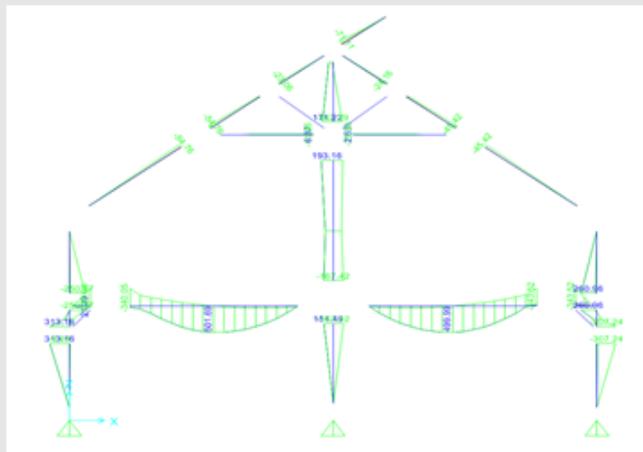
$\Delta_{plaz} = 5.0\text{mm}$; limite = 8.2mm



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

37

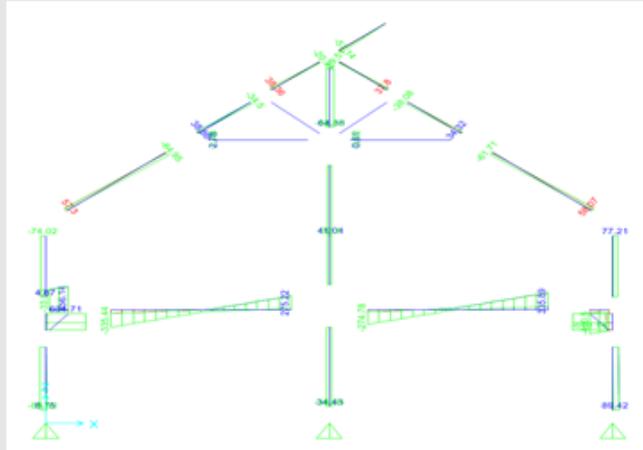
Enveloppe des moments



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

38

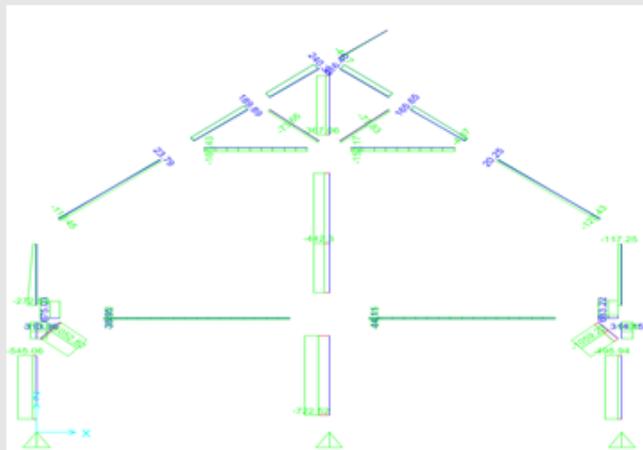
Enveloppe des efforts tranchants



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

39

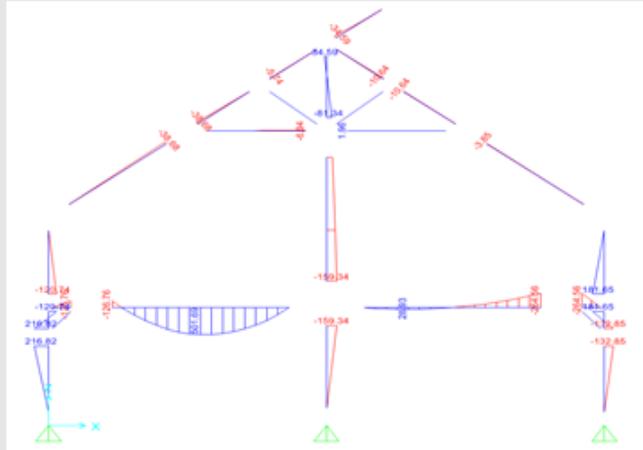
Enveloppe des charges axiales



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

40

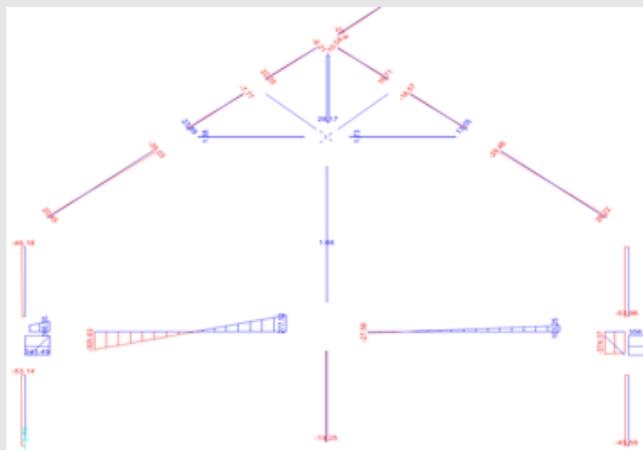
Cas : $1.25D + 1.5LL1 + 0.4WL1$ (Moment de flexion positif max)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

41

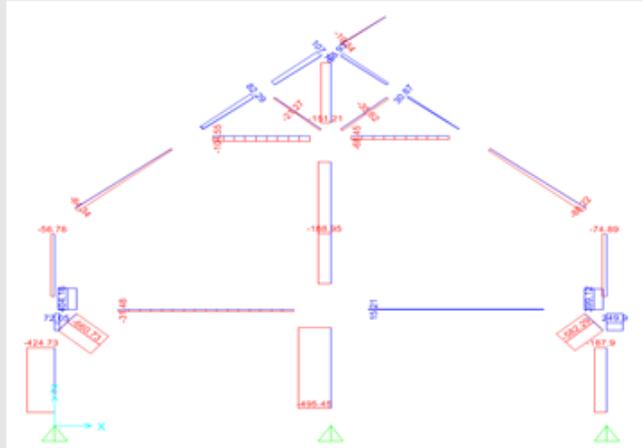
Cas : $1.25D + 1.5LL1 + 0.4WL1$ (Efforts tranchants)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

42

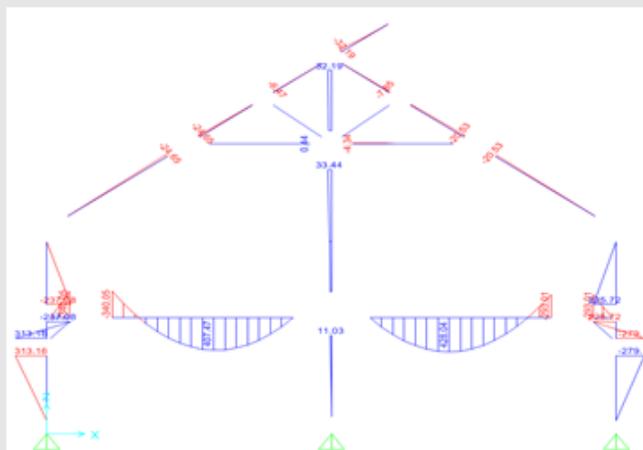
Cas : $1.25D + 1.5LL1 + 0.4WL1$ (Efforts axiaux)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

43

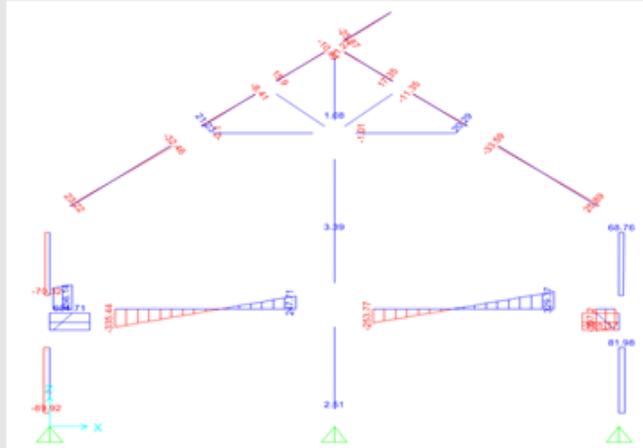
Cas : $1.25D + 1.5LL + 0.4WL1R$ (Moment de flexion négatif max)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

44

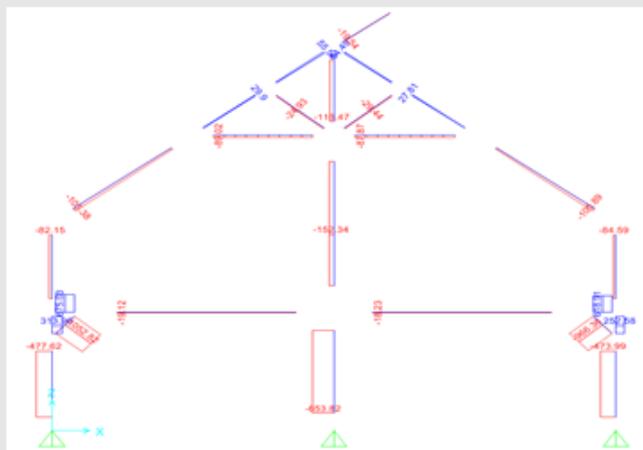
Cas : $1.25D + 1.5LL + 0.4WL1R$ (Efforts tranchants)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

45

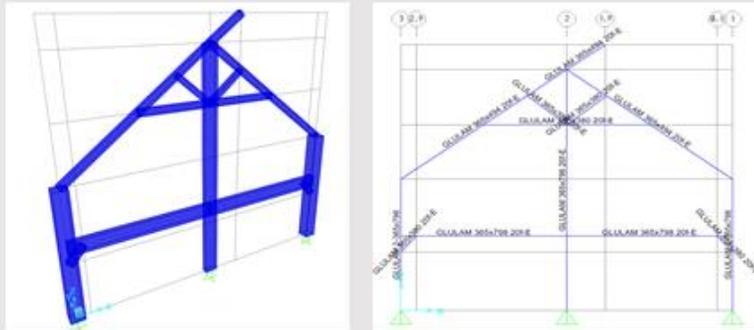
Cas : $1.25D + 1.5LL + 0.4WL1R$ (Efforts axiaux)



CONCEPT FINAL PROPOSÉ

46

Cadre rigide typique, axe A à G

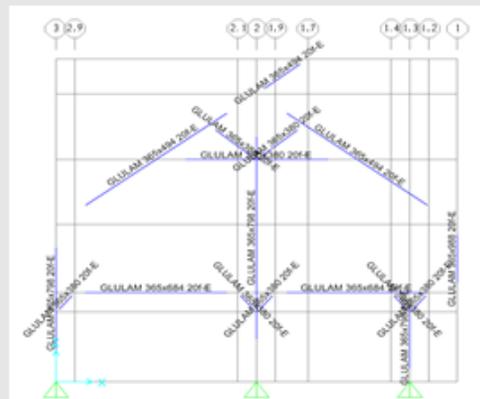


CONCEPT PROPOSÉ

47

Modifications pour le porte-à-faux

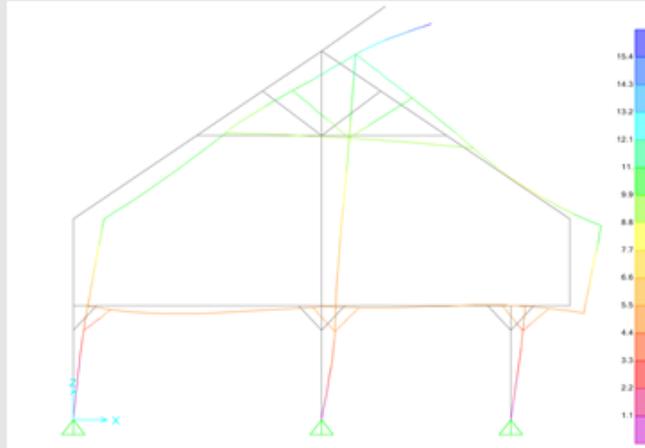
- Introduction de jambes de forces pour induire l'effet d'encastrement aux colonnes de rive
- Réduction possible des poutres de plancher due à une surcharge d'utilisation plus petite



CONCEPT PROPOSÉ

48

Déplacement latéral



$\Delta_{l_{12}} = 6.0\text{mm}$; limite = 6.6mm

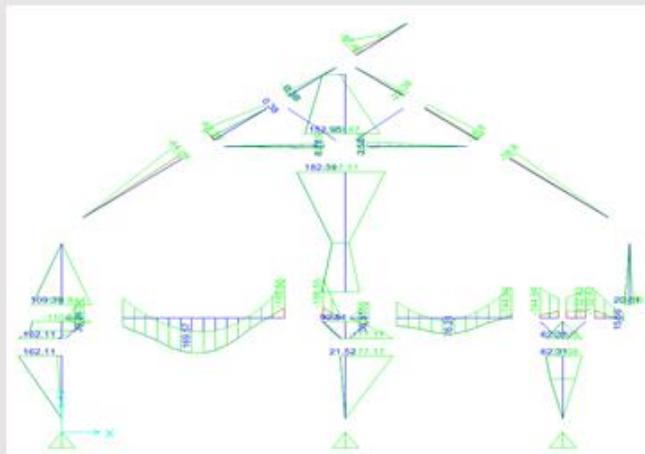
$\Delta_{l_{13}} = 4.98\text{mm}$; limite = 8.2mm



CONCEPT PROPOSÉ

49

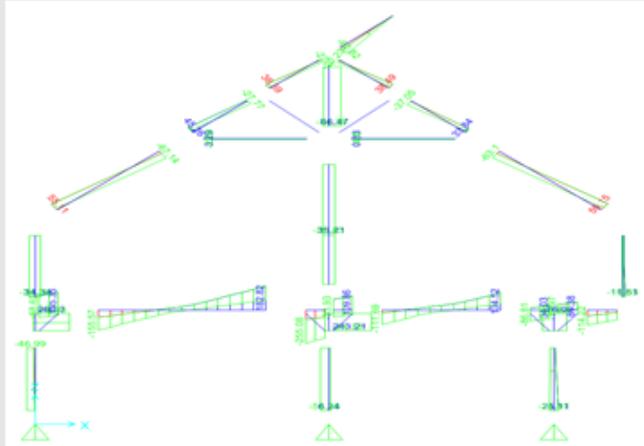
Enveloppe des moments



CONCEPT PROPOSÉ

50

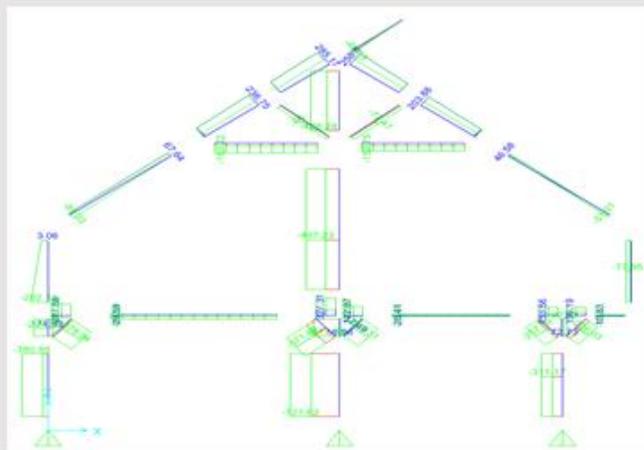
Enveloppe des efforts tranchants



CONCEPT PROPOSÉ

51

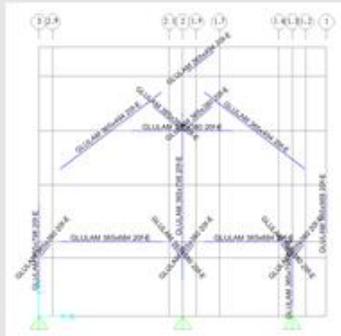
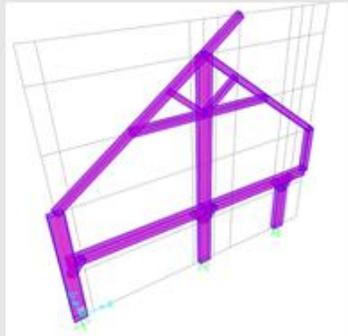
Enveloppe des charges axiales



CONCEPT PROPOSÉ

52

Cadre rigide en porte-à-faux, Axe J



CONCEPTION DES ASSEMBLAGES

53

Ex: Joint poutre de l'étage et colonne périphérique

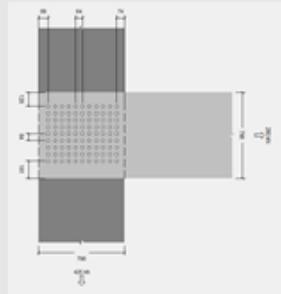
- Vis structurale de type MyTiCon Timber Connectors
- Produits ASSY VG Cyl⁽¹⁾ ou ASSY VG RH⁽²⁾ vissé en angle pour charges en tension
- Solution avec blocage vissé ou boulonné possible pour les charges verticales



Conception

54

Ex: Joint poutre de l'étage et colonne périphérique

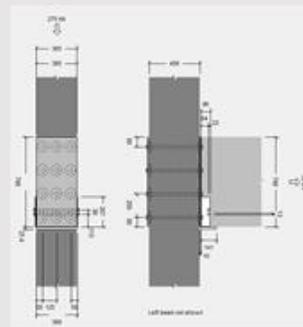
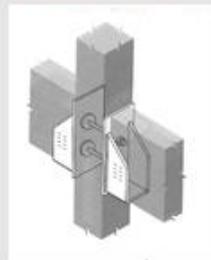


Conception

55

Ex: Joint poutre de l'étage et colonne centrale

- Boulons et disques de cisaillement en combinaison avec plaques d'acier



Questions

56



Fiche technique de la vis structurale

ASSY VG CYL Cylinder Head

Home / Products / ASSY VG CYL Cylinder Head



ASSY VG CYL Cylinder Head

The ASSY VG Cylinder head (CYL) screw is the screw used in timber reinforcements, beam supports and connectors where a small screw head is required. The small cylindrical head of the VG CyL is almost invisible when installed. The VG CYL screw is available in diameters of 6 mm (3/4"), 8 mm (5/8") and 10 mm (3/8"), lengths of 80 mm (3-1/8") to 400 mm (15-7/8").

Manufacturer : SHS

Category : Screws

Code approval : CCMC, ICC, ETA, LARF

Connection Type : Wood/Wood

[Where to Buy](#)

ATELIER 3 (DEUXIÈME PARTIE)

Analyse de cycle de vie – Bâtiment
net-zéro



Bibliothèque
de
Varennes

1

3^e atelier de travail - Mercredi 12 décembre 2018



2

Concept
Preliminaire
Structure en bois



Type de connections:

- Connection bois-bois vissé
- Connection breveté (Sherpa, Hyne, etc.)
- Connexion en acier boulonné, avec ou sans disques de cisaillement



Type de connections:

- Connection bois-bois vissé
- Connection breveté (Sherpa, Hyne, etc.)
- Connexion en acier boulonné, avec ou sans disques de cisaillement



Assemblage bois-bois vissé

Avantages

- Installation facile
- Haute capacité des vis structurales
- Réduit les déformations au niveau des joints
- Évite les assemblages en acier coûteux requérant un assemblage plus long en chantier

Inconvénients

- Coût élevé des vis structurales

Choix du type de connexion

- Vis structurale de type ASSY VG Cyl⁽¹⁾ ou ASSY VG RH⁽²⁾
- Lorsque requis, vissage en angle de 45° pour solliciter la capacité en tension de l'attache



SCÉNARIO 3

6

- La structure d'acier existante est remplacée par un équivalent en bois; il s'agit d'un cadre rigide transversalement.
- Le cadre typique est conçu pour reprendre la charge latérale de vent et de séisme.

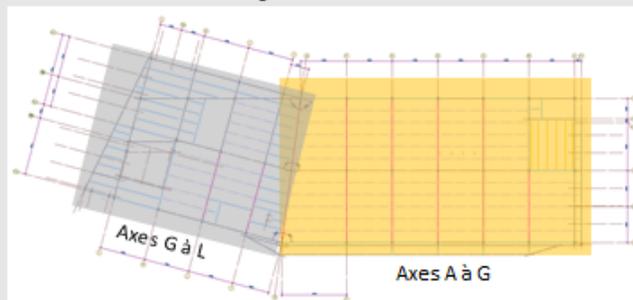


Scénario 3: Vue en plan

7

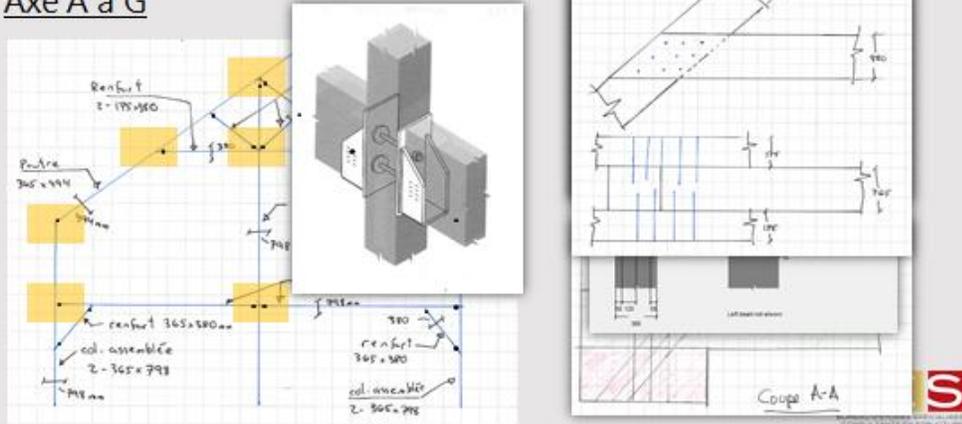
Deux types de cadre ont été considérés, selon l'utilisation et la géométrie:

- Salles de rayonnage (jaune);
- Salles de lecture et d'étude (gris).



Scénario 3

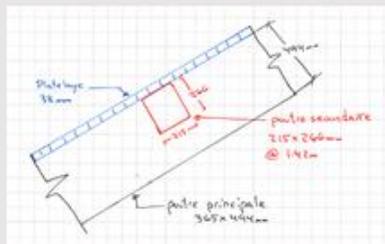
Axe A à G



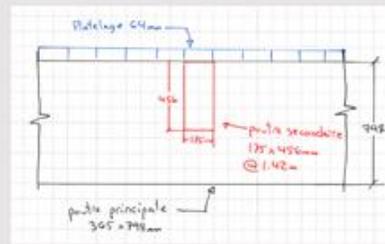
Scénario 3

Poutres secondaires

Toit

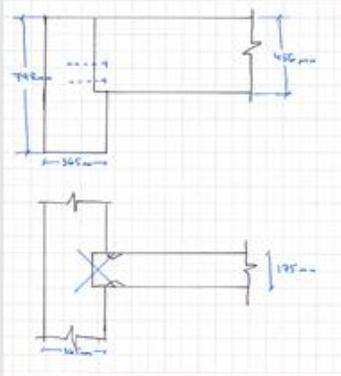


Étage



Scénario 3

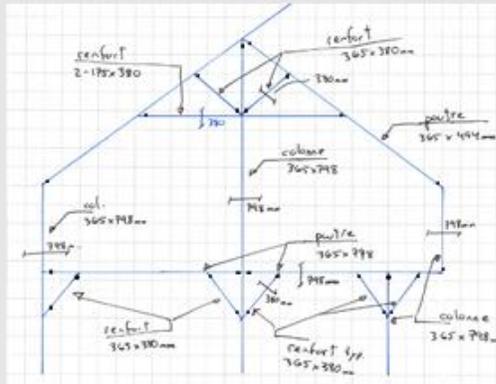
Poutres secondaires (suite)



Vis type Assy VG Cyl

Scénario 3

Axe G à L



Scénario 3: Quantité de bois

12

Axes A à G

Élément	Dimensions	Volume total (m³)
Poutres	565 x 795	34,56
	565 x 494	30,17
	175 x 495	65,1
Colonnes	565 x 795	59,5
Platelage		65,3
Autres	565 x 580	7,65
	175 x 580	7,95
Total =		300,5

Axes G à L

Élément	Dimensions	Volume total (m³)
Poutres	565 x 795	19,92
	565 x 494	17,24
	175 x 495	42,4
Colonnes	565 x 795	46,5
Platelage		40,4
Autres	565 x 580	6,55
	175 x 580	7,95
Total =		182,3



SCÉNARIO 4

13

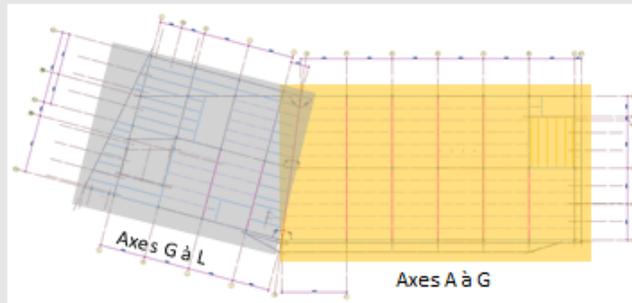
- La structure de bois est optimisée pour un bâtiment ayant un système de contreventement en CLT
- Le cadre typique est conçu pour reprendre les charges gravitaires seulement



Scénario 4: Vue en plan

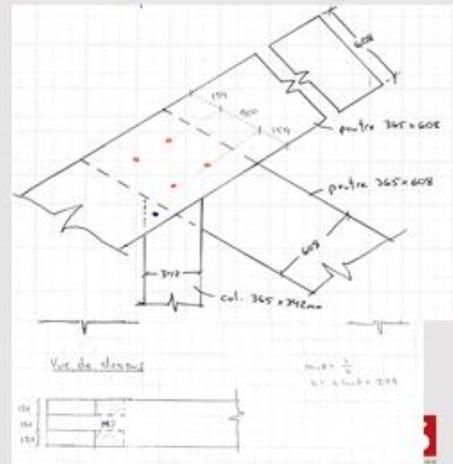
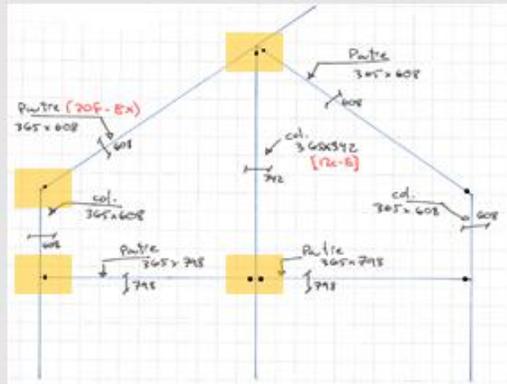
Deux types de cadre ont été considérés, selon l'utilisation:

- Salles de rayonnage (jaune);
- Salles de lecture et d'étude (gris).



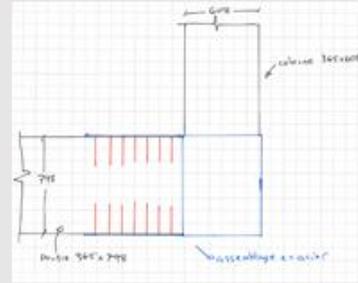
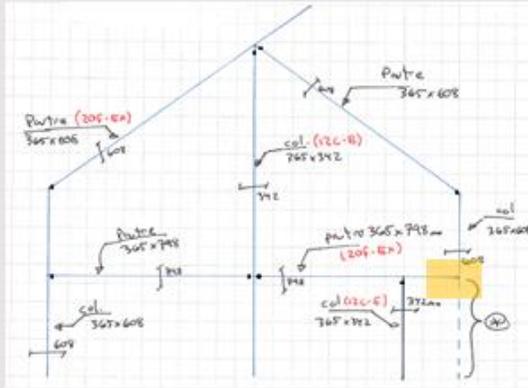
Scénario 4

Axe A à G



Scénario 4

Axe G à L

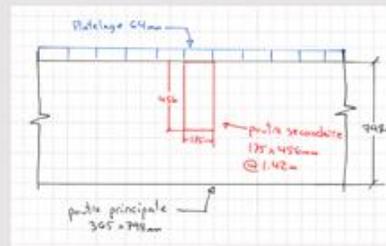
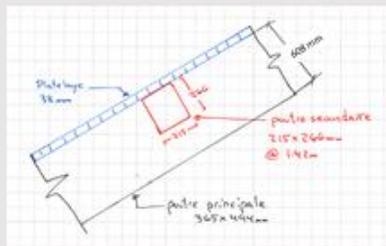


Scénario 4

Poutres secondaires

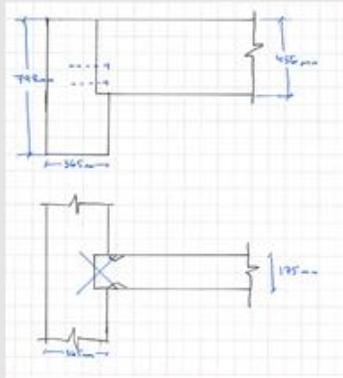
Toit

Étage



Scénario 4

Poutres secondaires (suite)



Vis type Assy VG Cyl

Scénario 4: Quantité de bois

Axes A à G

Élément	Dimensions	Volume total (m ³)
Poutres	365 x 795	34.9
	365 x 605	37.7
	175 x 455	65.1
Colonnes	365 x 605	23.3
	365 x 342	12.5
Platelage		65.2
Autres		6.6
Total =		245.0

Axes G à L

Élément	Dimensions	Volume total (m ³)
Poutres	365 x 795	19.9
	365 x 605	21.5
	175 x 455	43.4
Colonnes	365 x 605	16.6
	365 x 342	7.0
Platelage		40.4
Autres		6.6
Total =		155.4

Comparaison des scénarios

20

Comparaison des scénarios

Élément	Scénario 3 (m ²)	Scénario 4 (m ²)	Δ_{vol} (m ²)
Poutres	210.7	222.5	12
Colonnes	136.4	59.1	-77
Platelage	105.6	105.6	0
Autres	30.0	10.3	-20
Total	482.6	397.5	-85.1

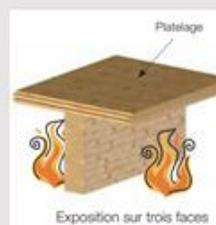
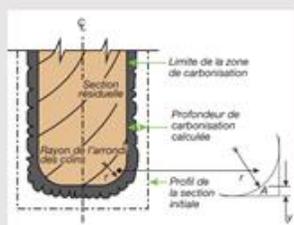


Scénario 4

21

Résistance au feu

1) Poutre



Scénario 4

Résistance au feu

2) Platelage



3) Colonnes



Scénario 4

Résistance au feu

Critères de calcul (méthode du Eurocode)

- Réduction de la section selon la durée d'exposition

$$d_{carb} = \beta_n t + d_o = \beta_n t + 7 \text{ mm}$$

(où t est le temps en minutes et supérieur à 20)

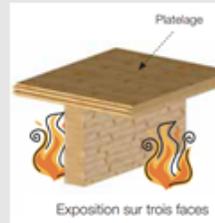
- Vitesse de propagation du lamellé-collé: $\beta_n = 0.65 \text{ mm/min}$
- Zone supplémentaire affaiblie par le feu $d_o = 7 \text{ mm}$
- Combinaison de charges pour le calcul de la résistance au feu:

$$1.0D + 0.5L$$

- Facteur d'ajustement à la norme canadienne: $k_f = 1.15$ cette combinaison de calcul lors des calculs de résistance

Scénario 4

Résistance au feu



Ex: poutre de l'étage

- Exposée sur 3 faces

$$d_{carb} = \beta_n t + d_o = 0.65 \text{ mm/min} * (45\text{min}) + 7\text{mm} = 36\text{mm}$$

- Poutre 365mm x 798mm :
 - Largeur $b = 365 - 2(36) = 293 \text{ mm}$
 - Profondeur $d = 798 - 36 = 762 \text{ mm}$
- Capacité à réévaluer avec la section réduite, selon la combinaison de charge réduite

Questions



Fiche technique de la vis structurale

ASSY VG CYL Cylinder Head Home / Products / ASSY VG CYL Cylinder Head



ASSY VG CYL Cylinder Head

The ASSY VG Cylinder head (CYL) screw is the screw used in timber reinforcement, beam supports and connections where a small screw head is required. The small cylindrical head of the VG CYL is almost invisible when installed. The VG CYL screw is available in diameters of 6 mm (3/8"), 8 mm (5/16") and 10 mm (3/8"), lengths of 80 mm (3-1/8") to 800 mm (30-1/8").

Manufacturer: SWS

Category: Screws

Code approval: CCMC, ICC, ETA, LARF

Connection Type: Wood/Wood

[Where to Buy](#)

ANNEXE 5 – RECONCEPTION DE L'ENVELOPPE

Tableau Annexe 29. Modification des éléments de l'enveloppe – partie 1

TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R
LISTE DES MATÉRIAUX	M1	LISTE DES MATÉRIAUX	M2	LISTE DES MATÉRIAUX	M3
revêtement type PA4	0.17	isolation de fondation polystyrène extrudé 50mm	10	revêtement type PA4	0.17
barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0	étanchéité de fondation	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0	fondation de béton	0.464	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	isolant giclé 50mm	11.538	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	film d'air intérieur	0.681	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538			isolant giclé 50mm	11.538
gypse 16mm fini peinture	0.55			gypse 16mm joints tirés	0.55
film d'air intérieur	0.681			film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	36.583125	valeur R totale (nominale)	23.233	valeur R totale (nominale)	36.5831
SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIAUX	M1_2b	LISTE DES MATÉRIAUX	M2_2b	LISTE DES MATÉRIAUX	M3_2b
revêtement type PA4	0.17	isolation de fondation polystyrène extrudé 76,2mm	15	revêtement type PA4	0.17
barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0	étanchéité de fondation	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0	fondation de béton	0.464	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 64mm	14.4225	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	isolant giclé 64mm	14.4225
membrane autocollante	0	gypse 16mm fini peinture	0.55	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	film d'air intérieur	0.681	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0			montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
gypse 16mm fini peinture	0.55			gypse 16mm joints tirés	0.55
film d'air intérieur	0.681			film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	16.391625	valeur R totale (nominale)	16.695	valeur R totale (nominale)	16.3916
BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R
LISTE DES MATÉRIAUX	M1_3	LISTE DES MATÉRIAUX	M2_3	LISTE DES MATÉRIAUX	M3_3
revêtement type PA4	0.17	isolation de fondation polystyrène extrudé 50mm	10	revêtement type PA4	0.17
barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0	étanchéité de fondation	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0	fondation de béton	0.464	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	isolant giclé 50mm	11.538	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	film d'air intérieur	0.681	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538			isolant giclé 50mm	11.538
gypse 16mm fini peinture	0.55			gypse 16mm joints tirés	0.55
film d'air intérieur	0.681			film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	36.583125	valeur R totale (nominale)	23.233	valeur R totale (nominale)	36.5831
BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIAUX	M1_4b	LISTE DES MATÉRIAUX	M2_4b	LISTE DES MATÉRIAUX	M3_4b
revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071	isolation de fondation polystyrène extrudé 50mm	10	revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071
barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0	étanchéité de fondation	0	barres Z ajustables 150mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0	fondation de béton	0.464	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03
membrane autocollante	0	isolant laine de roche 75mm	12	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	film d'air intérieur	0.681	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03			gypse 16mm joints tirés	0.55
gypse 16mm fini peinture	0.55			film d'air intérieur	0.681
film d'air intérieur	0.681				
valeur R totale (nominale)	36.930125	valeur R totale (nominale)	23.695	valeur R totale (nominale)	36.9301

Tableau Annexe 30. Modification des éléments de l'enveloppe – partie 2

TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R
LISTE DES MATÉRIAUX	M4	LISTE DES MATÉRIAUX	M5	LISTE DES MATÉRIAUX	M6
revêtement type RB1	0.59475	revêtement type RB1	0.59475	revêtement type PA4	0.17
fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538	isolant giclé 50mm	11.538	isolant giclé 50mm	11.538
vide - espacement	0	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse 16mm fini peinture	0.55
mobilier	0	film d'air intérieur	0.681	film d'air intérieur	0.681
montants métalliques 92mm @ 400mm c/c	0				
gypse 16mm joints tirés	0.55				
gypse 16mm fini peinture au pourtour du mobilier	0.55				
film d'air intérieur	0.681				
valeur R totale (nominale)	37.557875	valeur R totale (nominale)	37.007875	valeur R totale (nominale)	36.583125
SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)					
LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M4_2b	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M5_2b	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M6_2b
revêtement type RB1	0.17	revêtement type RB1	0.17	revêtement type PA4	0.17
fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 64mm	14.4225	isolant giclé 64mm	14.4225	isolant giclé 64mm	14.4225
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
vide - espacement	0	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse 16mm fini peinture	0.55
mobilier	0	film d'air intérieur	0.681	film d'air intérieur	0.681
montants métalliques 92mm @ 400mm c/c	0				
gypse 16mm joints tirés	0.55				
gypse 16mm fini peinture au pourtour du mobilier	0.55				
film d'air intérieur	0.681				
valeur R totale (nominale)	16.941625	valeur R totale (nominale)	16.391625	valeur R totale (nominale)	16.391625
BOIS					
LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M4_3	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M5_3	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M6_3
revêtement type RB1	0.59475	revêtement type RB1	0.59475	revêtement type PA4	0.17
fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 275mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 175mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538	isolant giclé 50mm	11.538	isolant giclé 50mm	11.538
vide - espacement	0	gypse 16mm fini peinture	0.55	gypse 16mm fini peinture	0.55
mobilier	0	film d'air intérieur	0.681	film d'air intérieur	0.681
montants métalliques 92mm @ 400mm c/c	0				
gypse 16mm joints tirés	0.55				
gypse 16mm fini peinture au pourtour du mobilier	0.55				
film d'air intérieur	0.681				
valeur R totale (nominale)	37.557875	valeur R totale (nominale)	37.007875	valeur R totale (nominale)	36.583125
BOIS+ (PLUS PLUS)					
LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M4_4b	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M5_4b	LISTE DES MATÉRIAUX	valeurs R M6_4b
revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071	revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071	revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071
fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	fourrures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 150mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 75mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 75mm @ 400mm c/c	0	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 100mm	14.2	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 100mm	14.2	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 120mm	17.03
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	membrane autocollante	0
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	gypse extérieur 16mm	0.568125
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 140mm	19.9	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 140mm	19.9	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
membrane pare-air / vapeur	0	membrane pare-air / vapeur	0	gypse 16mm joints tirés	0.55
vide - espacement	0	gypse 16mm joints tirés	0.55	film d'air intérieur	0.681
mobilier	0	film d'air intérieur	0.681		
montants métalliques 92mm @ 400mm c/c	0				
gypse 16mm joints tirés	0.55				
gypse 16mm fini peinture au pourtour du mobilier	0.55				
film d'air intérieur	0.681				
valeur R totale (nominale)	37.520125	valeur R totale (nominale)	36.970125	valeur R totale (nominale)	36.930125

Tableau Annexe 31. Modification des éléments de l'enveloppe – partie 3

TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R
LISTE DES MATÉRIEAUX	M7	LISTE DES MATÉRIEAUX	M8	TEL QUE CONSTRUIT	M9
revêtement type RB1	0.59475	revêtement type PA4	0.17	revêtement type PA1	0.17
fournures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 450mm c/c	0	barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 200mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 170mm @ 800mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 64mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538	isolant laine de roche 64mm	10	isolant giclé 50mm	11.538
gypse 16mm fini peinture	0.55	structure d'acier	0	montants métalliques 41mm @ 400mm c/c	0
film d'air intérieur	0.681			gypse 16mm fini peinture	0.55
				film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	37.007875	valeur R totale (nominale)	33.814125	valeur R totale (nominale)	36.583125
SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	M7_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX	M8_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX	M9_2b
revêtement type RB1	0.17	revêtement type PA4	0.17	revêtement type PA1	0.17
fournures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 450mm c/c	0	barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 200mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 170mm @ 800mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 64mm	14.4225	isolant giclé 64mm	14.4225	isolant giclé 64mm	14.4225
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 64mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
gypse 16mm fini peinture	0.55	structure d'acier	0	montants métalliques 41mm @ 400mm c/c	0
film d'air intérieur	0.681			gypse 16mm fini peinture	0.55
				film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	16.391625	valeur R totale (nominale)	15.160625	valeur R totale (nominale)	16.391625
BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	M7_3	LISTE DES MATÉRIEAUX	M8_3	LISTE DES MATÉRIEAUX	M9_3
revêtement type RB1	0.59475	revêtement type PA4	0.17	revêtement type PA1	0.17
fournures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 450mm c/c	0	barres Z ajustables 70mm @ 450mm c/c	0
barres Z ajustables 200mm @ 400mm c/c	0	barres Z ajustables 80mm @ 800mm c/c	0	barres Z ajustables 100mm @ 800mm c/c	0
isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076	isolant giclé 100mm	23.076
membrane autocollante	0	membrane autocollante	0	membrane autocollante	0
gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125	gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 64mm @ 400mm c/c	0	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
isolant giclé 50mm	11.538	poutre en bois 175mm	9.289	isolant giclé 50mm	11.538
gypse 16mm fini peinture	0.55			montants métalliques 41mm @ 400mm c/c	0
film d'air intérieur	0.681			gypse 16mm fini peinture	0.55
				film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	37.007875	valeur R totale (nominale)	33.103125	valeur R totale (nominale)	36.583125
BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	M7_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX	M8_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX	M9_4b
revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071	remplacé par M7_4b dans ce scénario		revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	1.071
fournures de bois 19x64mm @ 400mm c/c	0			barres Z ajustables 30mm @ 450mm c/c	0
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 200mm	28.4			panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 140mm	19.9
gypse extérieur 16mm	0.568125			gypse extérieur 16mm	0.568125
montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0			montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0
panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 40mm	5.7			panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 100mm	14.2
membrane pare-air / vapeur	0			montants métalliques 41mm @ 400mm c/c	0
gypse 16mm fini peinture	0.55			membrane pare-air / vapeur	0
film d'air intérieur	0.681			gypse 16mm fini peinture	0.55
				film d'air intérieur	0.681
valeur R totale (nominale)	36.970125	valeur R totale (nominale)	0	valeur R totale (nominale)	36.970125

Tableau Annexe 32. Modification des éléments de l'enveloppe – partie 4

TEL QUE CONSTRUIT		VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT		VALEURS F TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R		
LISTE DES MATÉRIEAUX		M10	LISTE DES MATÉRIEAUX		T1	LISTE DES MATÉRIEAUX		
	revêtement type PA1	0.17		revêtement métallique RM1	0.17		panneaux photovoltaïques + rails de montage	0
	barres Z ajustables 190mm @ 400mm c/c	0		membrane autocollante	0		vide d'air de 150mm	0
	isolant giclé 100mm	23.076		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		revêtement métallique RM1	0.17
	membrane autocollante	0		isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20		membrane autocollante	0
	gypse extérieur 16mm	0.568125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0		isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25		isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20
	isolant giclé 50mm	11.538		membrane pare-air / vapeur	0		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	gypse 16mm fini peinture	0.55		panneau support 16mm	0.568125		isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25
	film d'air intérieur	0.681		pontage d'acier	0		membrane pare-air / vapeur	0
							panneau support 16mm	0.568125
							pontage d'acier	0
valeur R totale (nominale)		36.583125	valeur R totale (nominale)		47.6206	valeur R totale (nominale)		47.620625
SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)		valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)		valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)		valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX		M10_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX		T1_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX		T2_2b
	revêtement type PA1	0.17		revêtement métallique RM1	0.17		panneaux photovoltaïques + rails de montage	0
	barres Z ajustables 190mm @ 400mm c/c	0		membrane autocollante	0		vide d'air de 150mm	0
	isolant giclé 64mm	14.4225		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		revêtement métallique RM1	0.17
	membrane autocollante	0		isolant laine de roche 50mm	8		membrane autocollante	0
	gypse extérieur 16mm	0.568125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0		isolant laine de roche 64mm	10		isolant laine de roche 50mm	8
	gypse 16mm fini peinture	0.55		membrane pare-air / vapeur	0		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	film d'air intérieur	0.681		panneau support 16mm	0.568125		isolant laine de roche 64mm	10
				pontage d'acier	0		membrane pare-air / vapeur	0
							panneau support 16mm	0.568125
							pontage d'acier	0
valeur R totale (nominale)		16.391625	valeur R totale (nominale)		20.6206	valeur R totale (nominale)		20.620625
BOIS		valeurs R	BOIS		valeurs R	BOIS		valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX		M10_3	LISTE DES MATÉRIEAUX		T1_3	LISTE DES MATÉRIEAUX		T2_3
	revêtement type PA1	0.17		revêtement métallique RM1	0.17		panneaux photovoltaïques + rails de montage	0
	barres Z ajustables 190mm @ 400mm c/c	0		membrane autocollante	0		vide d'air de 150mm	0
	isolant giclé 100mm	23.076		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		revêtement métallique RM1	0.17
	membrane autocollante	0		isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20		membrane autocollante	0
	gypse extérieur 16mm	0.568125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	montants métalliques 152mm @ 400mm c/c	0		isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25		isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20
	isolant giclé 50mm	11.538		membrane pare-air / vapeur	0		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
	gypse 16mm fini peinture	0.55		platelage bois 38mm	1.9905		isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25
	film d'air intérieur	0.681					membrane pare-air / vapeur	0
							platelage bois 38mm	1.9905
valeur R totale (nominale)		36.583125	valeur R totale (nominale)		49.043	valeur R totale (nominale)		49.043
BOIS+ (PLUS PLUS)		valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)		valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)		valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX		M10_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX		T1_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX		T2_4b
	remplacé par M5_4b dans ce scénario			revêtement métallique RM1	0.17		panneaux photovoltaïques + rails de montage	0
				membrane autocollante	0		vide d'air de 150mm	0
				contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125		revêtement métallique RM1	0.17
				panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6		membrane autocollante	0
				panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6		contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125
				membrane pare-air / vapeur	0		panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6
				platelage bois 38mm	1.9905		panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6
							membrane pare-air / vapeur	0
							platelage bois 38mm	1.9905
valeur R totale (nominale)		0	valeur R totale (nominale)		46.3018	valeur R totale (nominale)		46.30175

Tableau Annexe 33. Modification des éléments de l'enveloppe – partie 5

TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R	TEL QUE CONSTRUIT	VALEURS R
LISTE DES MATÉRIEAUX	T3	LISTE DES MATÉRIEAUX	T4	LISTE DES MATÉRIEAUX	S3
panneaux photovoltaïques + rails de montage	0	revêtement d'aluminium type PA3	0.17	revêtement d'aluminium type PA4	0.17
vide d'air de 70mm	0	barres Z ajustables 100mm	0	barres Z ajustables 50mm @ 400mm c/c	0
revêtement métallique RM1	0.17	vide d'air	0	suspension métallique @ 1200mm c/c	0
membrane autocollante	0	revêtement métallique RM1	0.17	vide - espacement	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	membrane autocollante	0	isolant giclé 100mm	23.076
isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	pontage d'acier	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20	dalle de béton	0.232
isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	revêtement de plancher	0.051
membrane pare-air / vapeur	0	isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25		
panneau support 16mm	0.568125	membrane pare-air / vapeur	0		
pontage d'acier	0	panneau support 16mm	0.568125		
		pontage d'acier	0		
valeur R totale (nominale)	47.620625	valeur R totale (nominale)	47.790625	valeur R totale (nominale)	23.529
SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R	SANS NET ZERO (ASHRAE 90.1 - 2010)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	T3_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX	T4_2b	LISTE DES MATÉRIEAUX	S3_2b
panneaux photovoltaïques + rails de montage	0	revêtement d'aluminium type PA3	0.17	revêtement d'aluminium type PA4	0.17
vide d'air de 70mm	0	barres Z ajustables 100mm	0	barres Z ajustables 50mm @ 400mm c/c	0
revêtement métallique RM1	0.17	vide d'air	0	suspension métallique @ 1200mm c/c	0
membrane autocollante	0	revêtement métallique RM1	0.17	vide - espacement	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	membrane autocollante	0	isolant giclé 89mm	20.1915
isolant laine de roche 50mm	8	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	pontage d'acier	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	isolant laine de roche 50mm	8	dalle de béton	0.232
isolant laine de roche 64mm	10	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	revêtement de plancher	0.051
membrane pare-air / vapeur	0	isolant laine de roche 64mm	10		
panneau support 16mm	0.568125	membrane pare-air / vapeur	0		
pontage d'acier	0	panneau support 16mm	0.568125		
		pontage d'acier	0		
valeur R totale (nominale)	20.620625	valeur R totale (nominale)	20.790625	valeur R totale (nominale)	20.6445
BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R	BOIS	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	T3_3	LISTE DES MATÉRIEAUX	T4_3	LISTE DES MATÉRIEAUX	S3_3
panneaux photovoltaïques + rails de montage	0	revêtement d'aluminium type PA3	0.17	revêtement d'aluminium type PA4	0.17
vide d'air de 70mm	0	barres Z ajustables 100mm	0	barres Z ajustables 50mm @ 400mm c/c	0
revêtement métallique RM1	0.17	vide d'air	0	suspension métallique @ 1200mm c/c	0
membrane autocollante	0	revêtement métallique RM1	0.17	vide - espacement	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	membrane autocollante	0	isolant giclé 89mm	20.1915
isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	platalage bois 64mm	3.3175
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	isolant "DECKMATE" de DOW 100mm	20	chape de béton 50mm	0.116
isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	revêtement de plancher	0.051
membrane pare-air / vapeur	0	isolant "DECKMATE" de DOW 125mm	25		
platalage bois 38mm	1.9905	membrane pare-air / vapeur	0		
		platalage bois 38mm	1.9905		
valeur R totale (nominale)	49.043	valeur R totale (nominale)	49.213	valeur R totale (nominale)	23.846
BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R	BOIS+ (PLUS PLUS)	valeurs R
LISTE DES MATÉRIEAUX	T3_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX	T4_4b	LISTE DES MATÉRIEAUX	S3_4b
panneaux photovoltaïques + rails de montage	0	revêtement d'aluminium type PA3	0.17	revêtement type RB2 (cèdre blanc de l'est)	0.17
vide d'air de 70mm	0	barres Z ajustables 100mm	0	barres Z ajustables 50mm @ 400mm c/c	0
revêtement métallique RM1	0.17	vide d'air	0	suspension métallique @ 1200mm c/c	0
membrane autocollante	0	revêtement métallique RM1	0.17	vide - espacement	0
contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	membrane autocollante	0	panneau de fibre de bois "Gutex" Multitherm 140mm	19.9
panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6	contreplaqué 19mm embouté / vissé	0.94125	membrane autocollante	0
panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6	panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6	platalage en bois 64mm	3.3175
membrane pare-air / vapeur	0	panneau de fibre de bois "Gutex" Ultratherm 160mm	21.6	chape de béton 50mm	0.116
platalage bois 38mm	1.9905	membrane pare-air / vapeur	0	revêtement de plancher	0.051
		platalage bois 38mm	1.9905		
valeur R totale (nominale)	46.30175	valeur R totale (nominale)	46.47175	valeur R totale (nominale)	23.3845

ANNEXE 6 – MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE

PREMIÈRE PARTIE DE L'ATELIER



**Martin Roy
et Associés inc.
(MRA)**

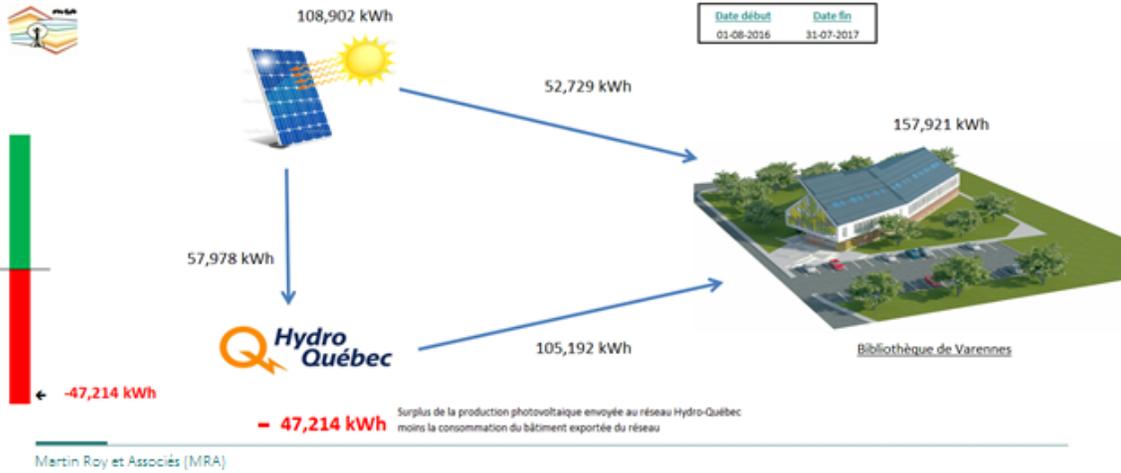
Modélisation Énergétique Bibliothèque Varennes Scénarios 1 et 2

Rodrigo Cerqueira ing. M.ing PA LEED
Martin Roy ing. LEED Fellow

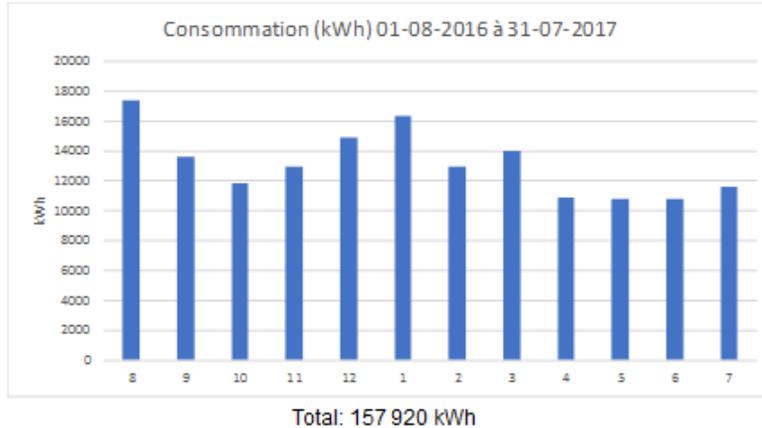


Indicateur Net Zéro

Mesurage et vérification entre juillet 2015 à juillet 2017



Consommation Électrique 2016/2017- Mesurage

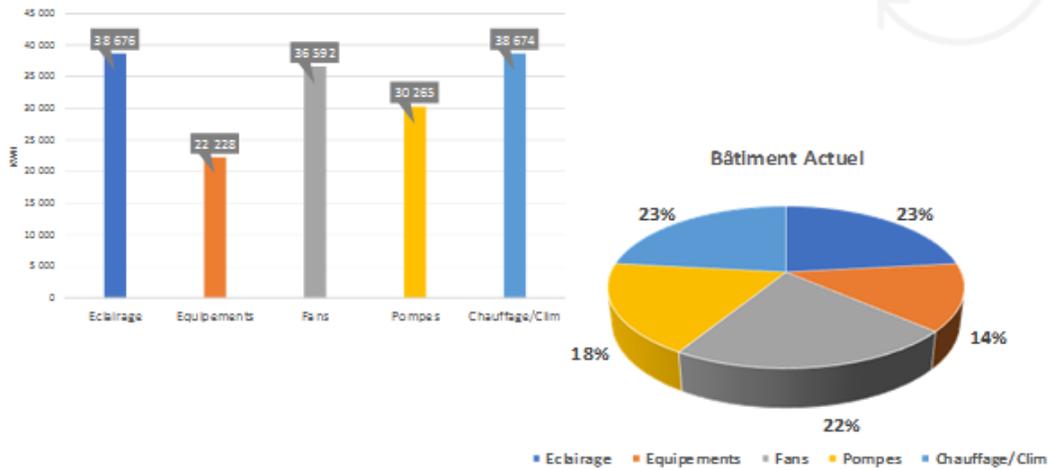


Intensité énergétique:
78 kWh/m²

Moyenne de Bâtiments bureaux* Québec:
262 kWh/m²

Martin Roy et Associés (MRA)

Consommation Électrique 2016/2017- Mesurage

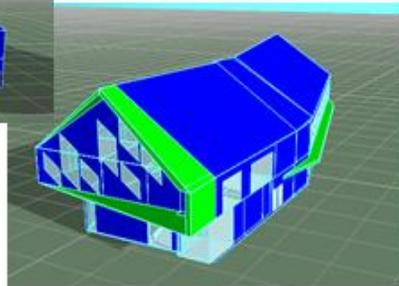
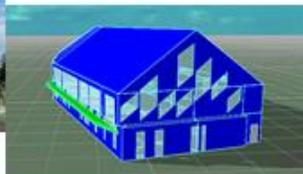


Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE

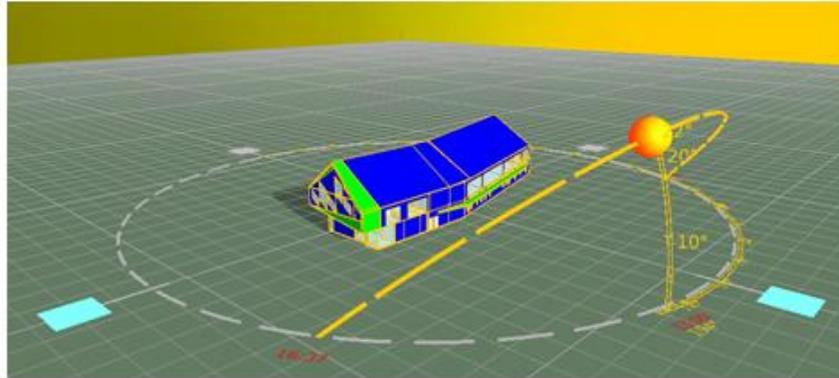


Superficie total $\approx 21\,700$ pi²



Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE



Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE - Paramètres

Enveloppe:

- Murs extérieurs: R28
- Toiture: R47
- Plancher:
 - Dalle de béton – plancher radiant
 - Dalle de béton structural

COMPOSITION TOITURES

COMPOSITION - T1

- REVÊTEMENT MÉTALLIQUE RM1
- MEMBRANE AUTOCOLLANTE
- CONTREPLAQUÉ 19mm EMBOUTIÉ/ÉVISSÉ
- ISOLANT 100mm
- CONTREPLAQUÉ 19mm EMBOUTIÉ/ÉVISSÉ
- ISOLANT 15mm
- MEMBRANE PARE-VAPEUR
- PANNEAU SUPPORT 19mm
- PONTAGE D'ACIER (VOIR PLANS D'ING)

COMPOSITION - T2

- PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUE + RAILS DE MONTAGE ET ANCRAGES (ANCRAGES MÉCANIQUES DES RAILS SUR LES JOINTS VERTICAUX DU REVÊTEMENT DE TOITURE RM1)
- VIDE D'AIR DE 150mm (VOIR INGÉNIEURS)
- REVÊTEMENT MÉTALLIQUE RM1
- MEMBRANE AUTOCOLLANTE
- CONTREPLAQUÉ 19mm EMBOUTIÉ/ÉVISSÉ
- ISOLANT 100mm
- CONTREPLAQUÉ 19mm EMBOUTIÉ/ÉVISSÉ
- ISOLANT 15mm
- MEMBRANE PARE-VAPEUR
- PANNEAU SUPPORT 19mm
- PONTAGE D'ACIER (VOIR PLANS D'ING)

COMPOSITION MURS EXTÉRIEURS

COMPOSITION - M1

- REVÊTEMENT TYPE P44 (VOIR ÉLEVATION)
- BARRÉS 2 AJUSTABLES 70mm À 400mm CC
- BARRÉS 2 AJUSTABLES 100mm À 800mm CC
- ISOLANT GICLÉ 100mm
- MEMBRANE AUTOCOLLANTE
- GYPSE EXTÉRIEUR 16mm
- MONTANTS MÉTALLIQUES 150mm À 400mm CC
- ISOLANT GICLÉ 50mm
- GYPSE 16mm FIN PÉTURE

COMPOSITION - M2

- ISOLATION DE FONDATION (VOIR ING)
- ÉTANCHÉRIE DE FONDATIONS
- FONDATIONS DE BÉTON
- MONTANTS MÉTALLIQUES 150mm À 400mm CC
- ISOLANT GICLÉ 50mm
- GYPSE 16mm FIN PÉTURE

COMPOSITION - M3

- REVÊTEMENT TYPE P44 (VOIR ÉLEVATION)
- BARRÉS 2 AJUSTABLES 275mm À 400mm CC
- BARRÉS 2 AJUSTABLES 100mm À 800mm CC
- ISOLANT GICLÉ 100mm
- MEMBRANE AUTOCOLLANTE
- GYPSE EXTÉRIEUR 16mm
- MONTANTS MÉTALLIQUES 150mm À 400mm CC
- ISOLANT GICLÉ 50mm
- GYPSE 16mm JOINT TRÈS

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE - Paramètres

Enveloppe:

- Fenêtres:
 - Verres V1-V2
 - $U_{(ensemble)}$: 0,32
 - SHGC: 0,60
 - Verres V3-V4-V7
 - $U_{(ensemble)}$: 0,24
 - SHGC: 0,40
 - Verres V5
 - $U_{(ensemble)}$: 0,30
 - SHGC: 0,62

Logiciel: Window 7.6 - LBNL

Overall Thickness: 1.798 inches Mode: [N] Model Definition: []

ID	Name	Mode	Thick	U	Tsol	Fsol1	Fsol2	Tvis	Fvis1	Fvis2	Ft	E1	E2	Conc	Comment
Glass 1	103 CLEAR_GLAT		0.235	0.771	0.870	0.079	0.084	0.800	0.000	0.000	3.340	0.840	0.570		
Gap 1	9 Air (EG) / Argon (R03)		0.472												
Glass 2	1511 HMT-CBS-SAT		0.803	0.506	0.291	0.285	0.081	0.833	0.029	0.030	3.110	0.105	0.001		
Gap 2	9 Air (EG) / Argon (R03)		0.472												
Glass 3	103 CLEAR_GLAT		0.235	0.771	0.870	0.079	0.084	0.800	0.000	0.000	3.340	0.840	0.570		

U-factor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Layer 1 Keff	Gap 1 Keff	Layer 2 Keff	Gap 2 Keff
Btu/h ² F			Btu/h ²			Btu/h ² F	Btu/h ² F	Btu/h ² F	Btu/h ² F
0.147	0.537	0.407	110	0.631	0.6201	0.5770	0.8135	0.0910	3.7481

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE - Paramètres

Logiciel: Window 7.6 - LBNL

Overall Thickness: 1.798 inches Mode: [N] Model Definition: []

U-factor: 0.236
SHGC: 0.403
VT: 0.523
CR: N/A

Click on a component to display characteristics below

Glazing System

Name: 2011112/V3/V4/V7

ID: 90 Ucenter: 0.146 Btu/h²F

Layers: 3 SC: 0.536

Area: 14.12 ft² SHGC: 0.466

Edge area: 3.80 ft² Vtc: 0.631

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE - Paramètres

Charges:

- Éclairage
 - Contrôle de luminosité naturelle
 - Détecteurs de mouvement
- Éclairage extérieur
- Charges aux prises
- Ascenseur
- Bornes électriques

Systèmes CVCA:

- Boucle géothermique
 - Thermopompes
 - Pompes
 - Plancher radiant
- Ventilateurs
- Convecteurs à l'eau
- Ventilateurs d'extraction

Traitement d'air neuf:

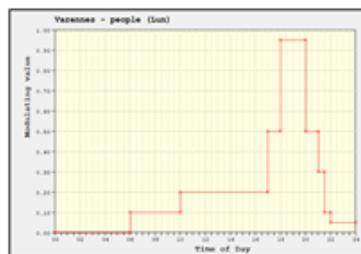
- Ventilation central (air neuf)
- Récupérateur de chaleur
- Préchauffage d'air neuf par les panneaux PV
- Détecteur de CO₂

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE - Calibration

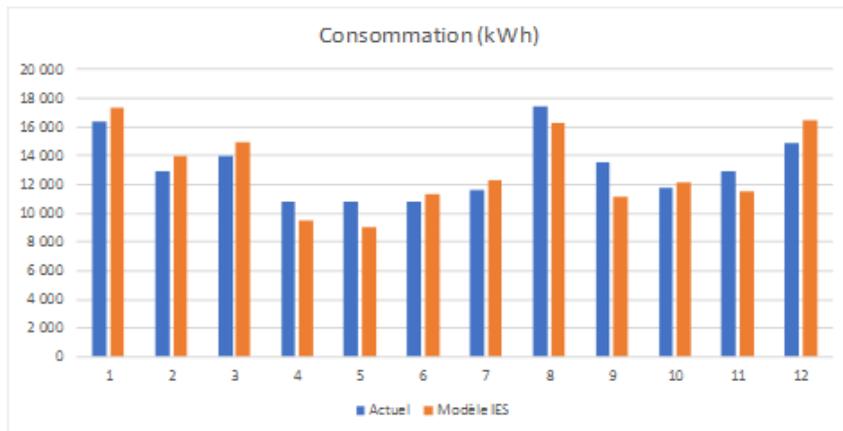
Calibration :

- Données météorologiques réelles: 08-2016 à 07-2017
- Profiles ajustés selon les données mesurées
- Gains et pertes de chaleurs
- Efficacités des équipements



Martin Roy et Associés (MRA)

Modèle IES - Calibration



Ashrae guideline
14 – 2014:

- R^2 : 0.77
- NBME: 1.1%
- CV(RMSE): 9.9%

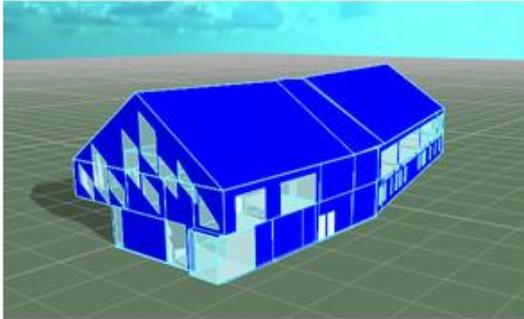
Actuel total: 157 920 kWh

Modèle IES total: 155 172 kWh

Martin Roy et Associés (MRA)



Scénario 2 – référence ASHRAE 90.1-2010



Appendice G – ASHRAE 90.1-2010
Zone climatique 6:

- Paramètres identiques:
 - Logiciel de modélisation
 - Données météorologiques
 - Surface du bâtiment
 - Zones thermiques
 - Occupants
 - Profils
 - Infiltration
 - Charges aux prises
 - Débits d'air neuf
 - Ventilateurs d'extraction

Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 2 – référence ASHRAE 90.1-2010

Charges:

- Éclairage ASHRAE 90.1
- Éclairage extérieur ASHRAE 90.1

Systèmes CVCA:

- PSZ-HP:
 - Thermopompe par zone thermique avec serpentin électrique pour l'appoint de chauffage
- Efficacités selon ASHRAE
- Capacités (débits et puissance):
 - calculés selon les charges plus 25% Chauffage – 15% Refroidissement

Traitement d'air neuf:

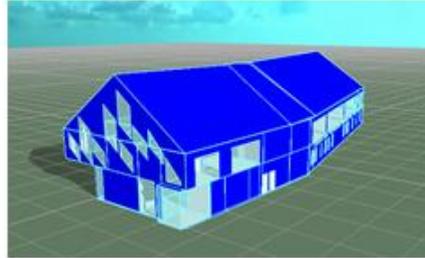
- Pas de ventilation central
- Pas de récupérateur de chaleur pour l'air neuf
- Pas de préchauffage d'air neuf par les panneaux PV
- Pas de détecteur de CO₂

Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 2 – référence ASHRAE 90.1-2010

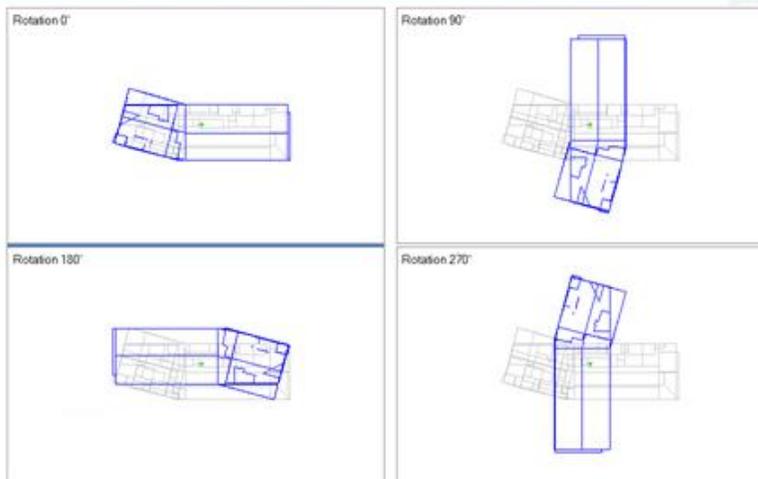
Enveloppe:

- Murs extérieurs (*Steel-Framed*): R16.6
- Toiture (*Insolation Entirely above Deck*): R20.8
- Plancher (*Steel-joist*): R26
- Fenêtres (*Metal framing*):
 - $U_{(ensemble)}$: 0,55
 - SHGC: 0,40
- Rotation de l'enveloppe (0°, 90°, 180° et 270°)
- Aucun élément d'ombrage



Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 2 – Rotation référence



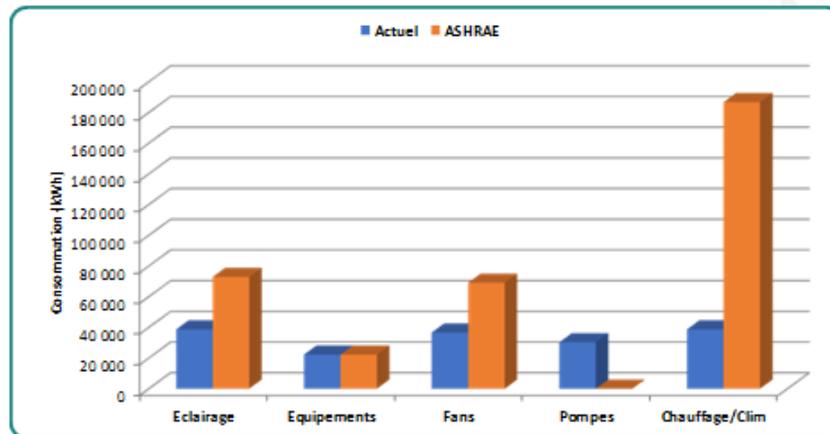
Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 1 vs Scénario 2

Paramètre	Bâtiment actuel	Référence ASHRAE 90.1
Mur extérieur	R28	R16.6
Toiture	R47	R20.8
Plancher	Béton structurel et béton plancher radiant	structure métallique
Fenêtres	U: 0.32 - SHGC: 0,60	U: 0.55 - SHGC: 0.40
	U: 0.24 - SHGC: 0,40	
	U: 0.30 - SHGC: 0,62	
Orientation	0°	Rotation en 4 orientation
Ombrage	Marquises	-
Éclairage	Selon les plans électriques	Densités d'ASHRAE selon utilisation des pièces
Système CVCA	Thermopompes géothermiques	PSZ-HP - thermopompe pour chaque zone
	Plancher radiants	Serpentin électrique pour l'appoint
	Ventilo-convecteurs	Efficacités ASHRAE
Ventilation central	Oui	-
Récupération de chaleur	Oui	-
Préchauffage solaire d'air neuf	Oui	-
Détecteur de CO2	Oui	-

Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 2 – référence ASHRAE 90.1-2010



Total ASHRAE: 356 744 kWh

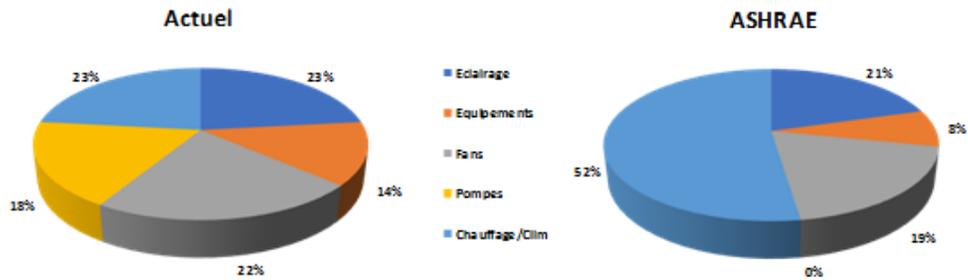
Économies d'énergie: 56.50%

Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 2 – référence ASHRAE 90.1-2010

Total Bâtiment NET-ZÉRO : 157 920 kWh

Total Bâtiment conventionnel (ASHRAE): 356 744 kWh



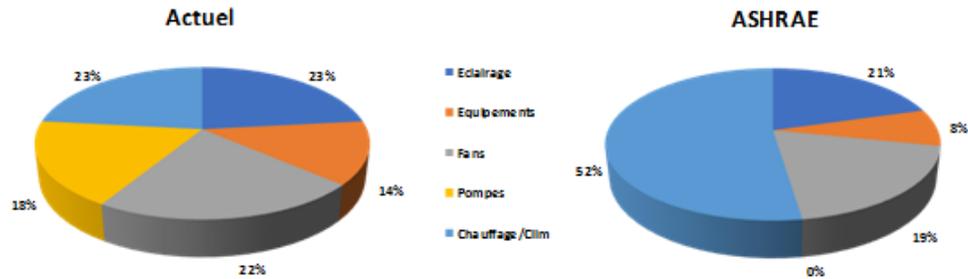
Économies d'énergie du bâtiment actuel par rapport au bâtiment de référence : **56.50%**

Martin Roy et Associés (MRA)

Comparaison selon ASHRAE 90.1-2010

Total bâtiment NET-ZÉRO (Actuel): 155 172 kWh

Total bâtiment de référence ASHRAE: 356 744 kWh



Économies d'énergie du bâtiment actuel par rapport au bâtiment de référence : **56.50%**

Martin Roy et Associés (MRA)



Martin Roy
et Associés inc.
(MRA)

Modélisation Énergétique Bibliothèque Varennes

Scénarios 1 et 2

Questions?



DEUXIÈME PARTIE DE L'ATELIER



**Martin Roy
et Associés inc.
(MRA)**

Modélisation Énergétique Bibliothèque Varennes

Scénarios 3 - 4 - 5

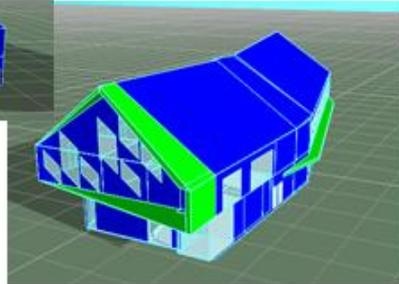
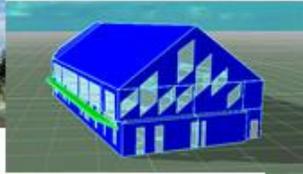
Rodrigo Cerqueira ing. M.ing PA LEED
Martin Roy ing. LEED Fellow



Modélisation Énergétique – IES VE

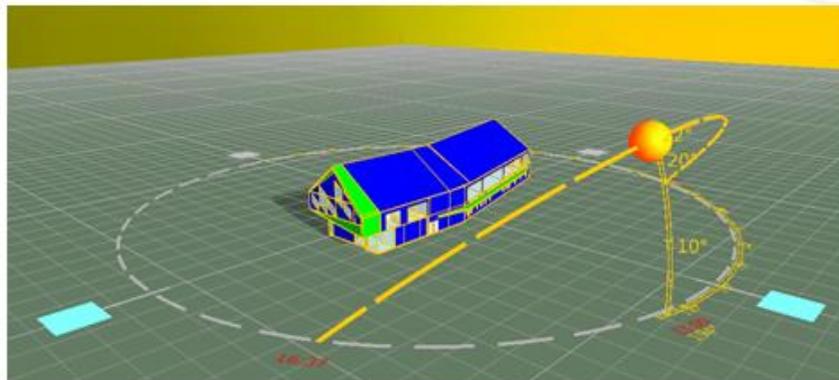


Superficie total $\approx 21\,700 \text{ m}^2$



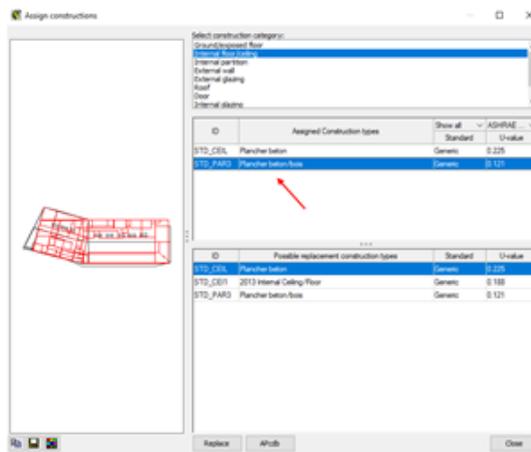
Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – IES VE



Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – Scénarios 3 et 4



Modèle ne considère pas la structure du bâtiment:

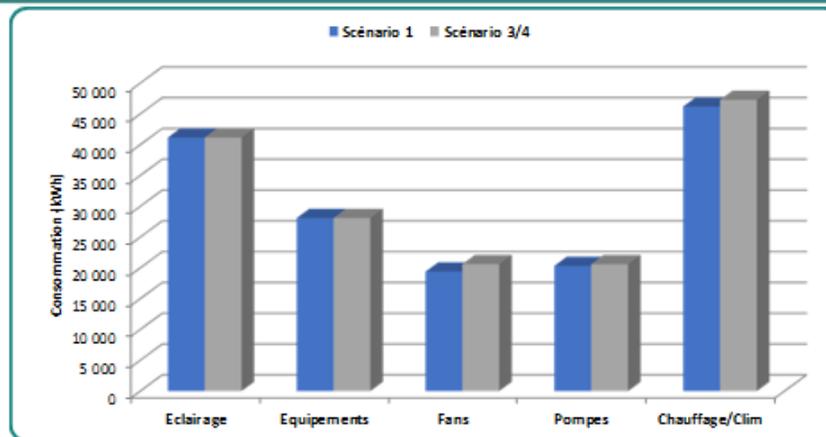
- Plancher intérieure béton/bois
- Murs extérieures – ossature en bois

Mêmes résistances thermiques scénarios 1, 3 et 4

Un seul modèle pour les scénarios 3 et 4

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – Scénarios 3 et 4



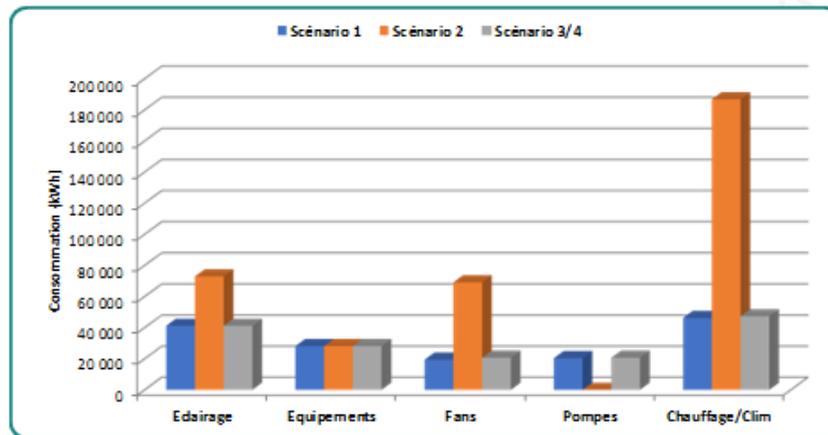
Total Scénario 1: 155 172 kWh

Total Scénarios 3 et 4 : 157 764 kWh

Surplus d'énergie: 1.67%

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – Scénarios 3 et 4



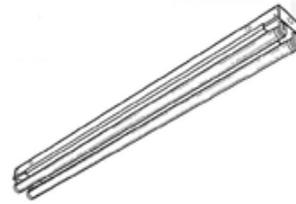
Martin Roy et Associés (MRA)



Optimisation des systèmes - Éclairage

Actuel:

- Majoritairement fluorescent: T5 et T8



Scénario 5:

- 100% LED



Réduction de la puissance installée de: **50%**

Martin Roy et Associés (MRA)

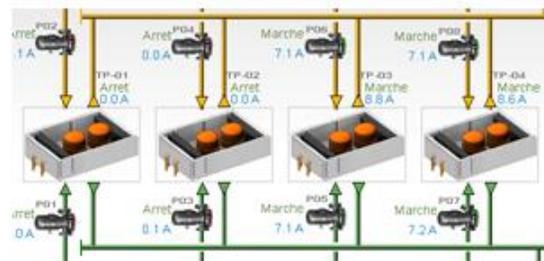
Optimisation des systèmes - Thermopompes

Actuel:

- Thermopompes géothermiques
COP: 4 – EER: 20.3

Scénario 5:

- Thermopompes géothermiques
COP: 5 – EER: 25.7



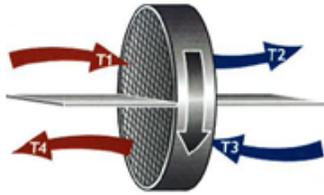
Augmentation de la performance de: **25%**

Martin Roy et Associés (MRA)

Optimisation des systèmes – ERV

Actuel:

- Roue thermique:
 - Efficacité: 50%

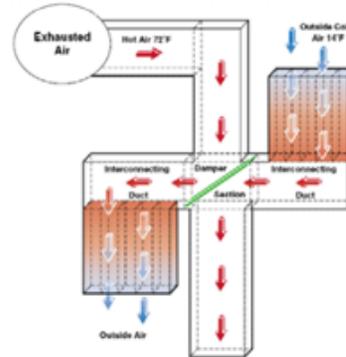


Augmentation de la performance de : 60%

Martin Roy et Associés (MRA)

Scénario 5:

- Récupérateur à cassettes:
 - Efficacité: 80%



Optimisation des systèmes – Contrôle ventilation

Actuel:

- Ventilateur-convecteur horaire ventilation:
 - Lundi à Vendredi: 07h00 à 21h00
 - Samedi: 08h00 à 16h00
 - Dimanche: 10h00 à 16h00
- Modulation en bas régime: 30%

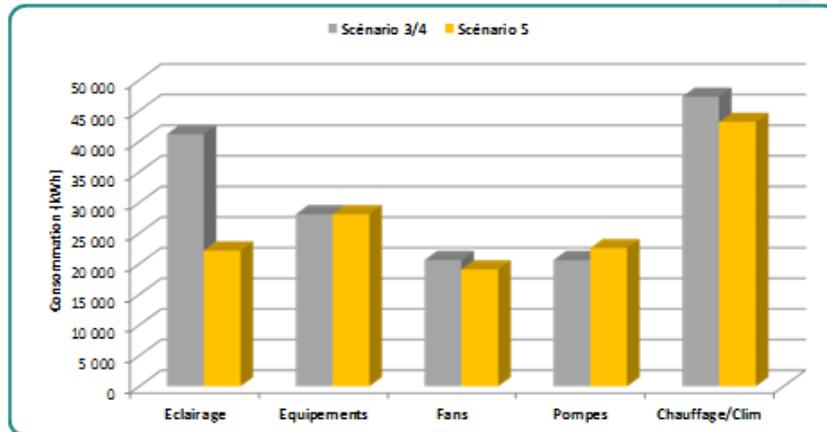
Économies d'énergie de : 5%

Scénario 5:

- Ventilateur-convecteur horaire ventilation – selon horaire d'ouverture publique
- Modulation en bas régime: 15%

Martin Roy et Associés (MRA)

Modélisation Énergétique – Scénarios 3 et 4



Total Scénario 3 et 4: 157 764 kWh
Total Scénarios 5: 135 057 kWh

Économie d'énergie: **14.4%**

Martin Roy et Associés (MRA)

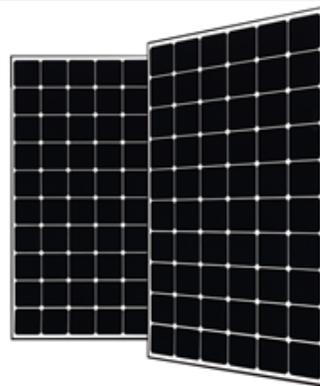
Optimisation des systèmes – Photovoltaïque

Actuel:

- 425 panneaux – 260W/unité
- Puissance totale: 110.5 kW
- Efficacité: 15%

Scénario 5:

- 425 panneaux – 365W/unité
- Puissance totale: 155.125 kW
- Efficacité: 21.1%
- Modèle: LG Neon 365



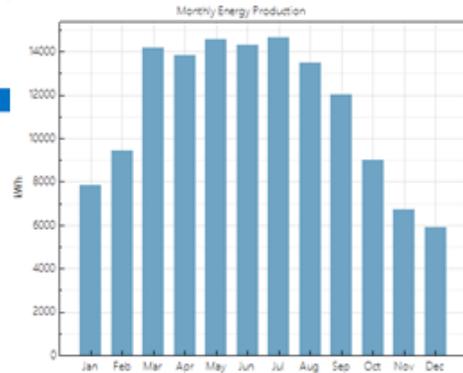
Augmentation de la performance de : **40%**

Martin Roy et Associés (MRA)

Modèle énergétique – SAM

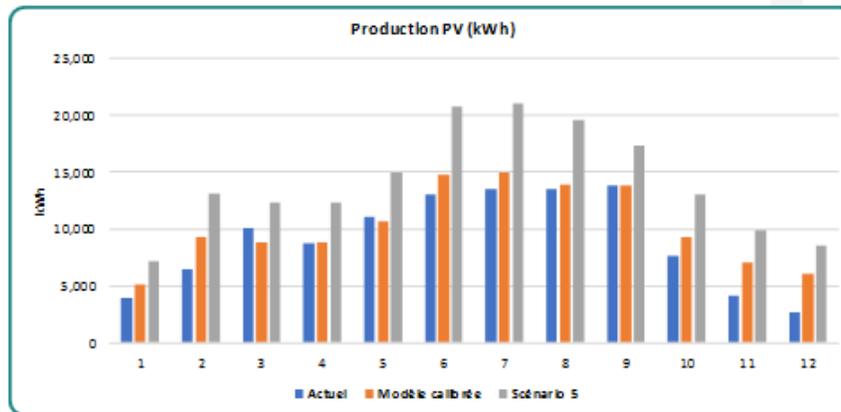
NREL - System advisor model (SAM)

Metric	Value
Annual energy (year 1)	135,901 kWh
Capacity factor (year 1)	14.0%
Energy yield (year 1)	1,230 kWh/kW



Martin Roy et Associés (MRA)

Optimisation des systèmes – Photovoltaïque



Actuel (2016-2017): 108 902 kWh
 Modèle calibré: 122 742 kWh
 Scénario 5: 170 224 kWh

Surplus d'énergie: 39%

Martin Roy et Associés (MRA)

Énergie - Scénarios

Données météorologiques de aout 2016 à juillet 2017

Scénarios	Description	Consommation (kWh)	Production PV (kWh)	% Économie*	% Net Zéro
Scénario 1	Bâtiment Actuel	155 172	122 742	-	79%
Scénario 2	Référence ASHRAE	356 744	-	-129.90%	-
Scénario 3 et 4	Structure bois	157 764	122 742	-1.67%	77%
Scénario 5	Structure bois+ optimisation de systèmes	135 057	170 224	12.96%	126%

* Économies d'énergie par rapport scénario 1

Martin Roy et Associés (MRA)

Énergie - Scénarios

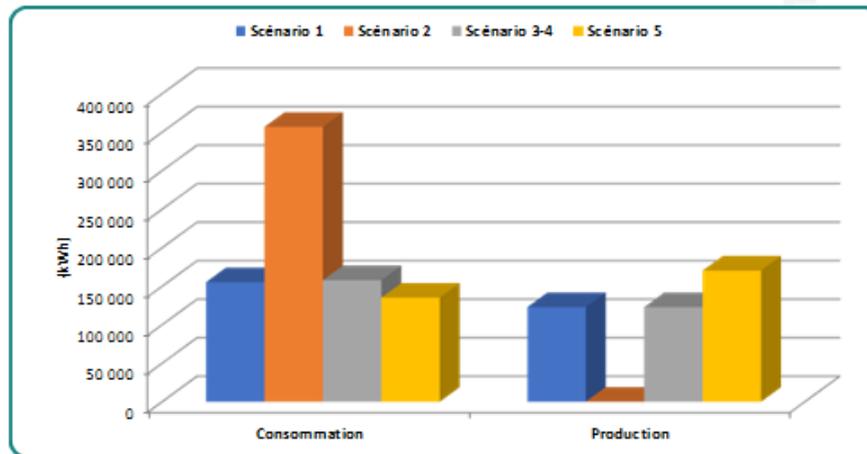
Données météorologiques de aout 2016 à juillet 2017

Scénarios	Description	Consommation (kWh)	Production PV (kWh)	% Économie*	% Net Zéro
Scénario 1	Bâtiment Actuel	155 172	122 742	-	79%
Scénario 2	Référence ASHRAE	356 744	-	-129.90%	-
Scénario 3 et 4	Structure bois	157 764	122 742	-1.67%	77%

* Économies d'énergie par rapport scénario 1

Martin Roy et Associés (MRA)

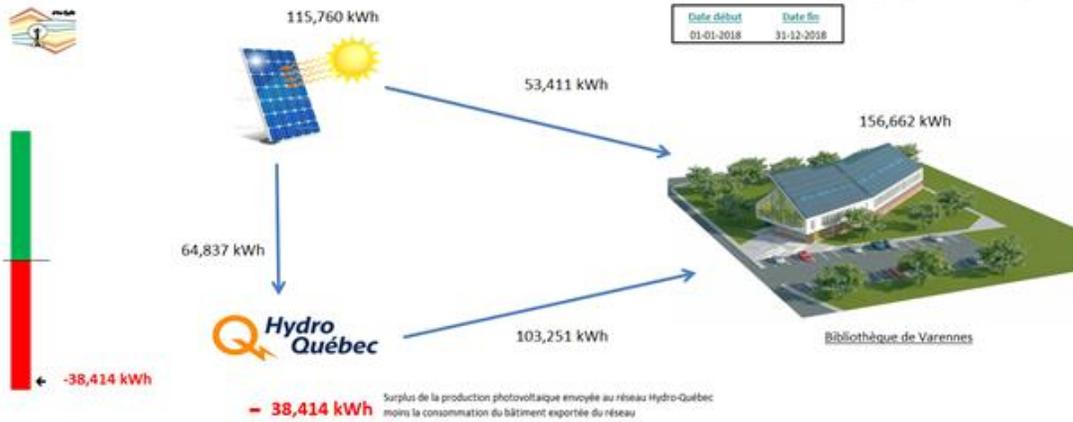
Énergie - Scénarios



Martin Roy et Associés (MRA)

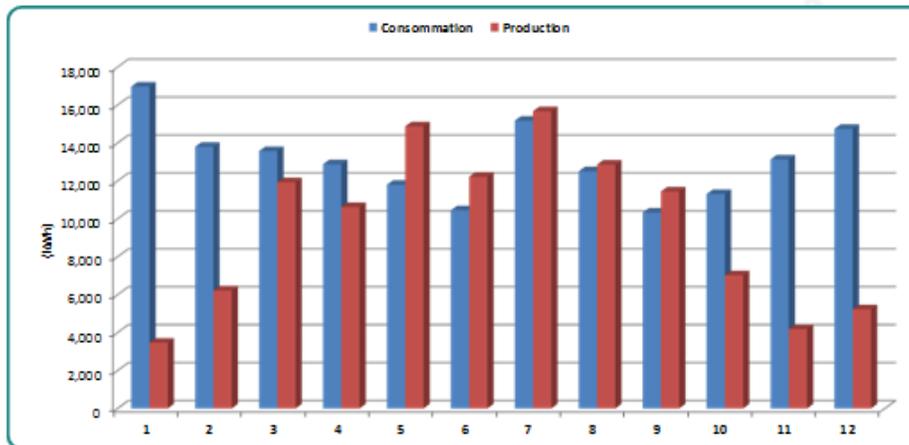


Indicateur Net Zéro - 2018



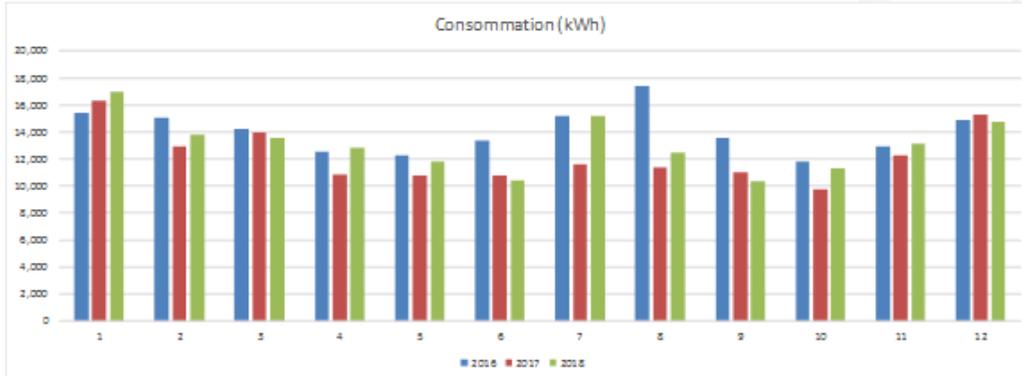
Martin Roy et Associés (MRA)

Consommation et Production PV - 2018



Martin Roy et Associés (MRA)

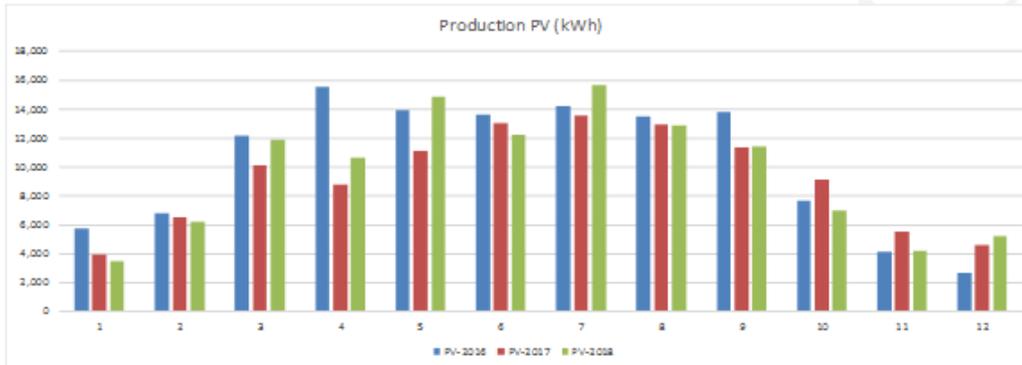
Bâtiment Actuel – Consommation



Année	Total	PV	% Net Zéro
2016	168,696	123,887	73%
2017	146,944	110,678	75%
2018	156,662	115,760	74%

Martin Roy et Associés (MRA)

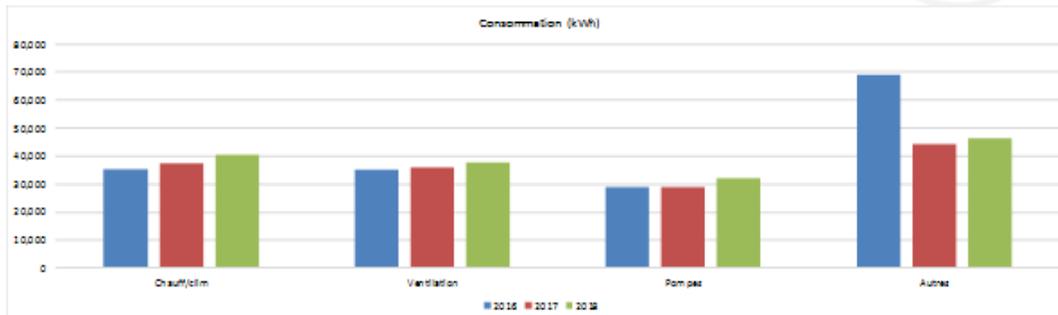
Bâtiment Actuel – Production



Année	Total	PV	% Net Zéro
2016	168,696	123,887	73%
2017	146,944	110,678	75%
2018	156,662	115,760	74%

Martin Roy et Associés (MRA)

Bâtiment Actuel – Consommation



Année	Chauffage	Ventilation	Pompes	Autres	Total	PV	%Net Zéro
2016	35,301	35,214	28,983	69,198	168,696	123,887	73%
2017	37,587	36,002	28,971	44,383	146,944	110,678	75%
2018	40,380	37,803	32,259	46,220	156,662	115,760	74%

Martin Roy et Associés (MRA)



Martin Roy
et Associés inc.
(MRA)

Modélisation Énergétique Bibliothèque Varennes Scénarios 3 – 4 et 5

Questions?



ANNEXE 7 – LES CATÉGORIES D'IMPACTS SELON LA MÉTHODE TRACI ET LA MÉTHODE IMPACT 2002+

Catégories d'impacts	Unité
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11
Réchauffement climatique	kg éq. CO2
Formation de smog photochimique	kg éq. O3
Acidification	kg éq. SO2
Eutrophisation	kg éq. N
Effets cancérigènes	CTUh
Effets non-cancérigènes	CTUh
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5
Écotoxicité	CTUe
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus

Catégories d'impacts	Unité
Effets cancérigènes	kg éq. C2H3Cl
Effets non cancérigènes	kg éq. C2H3Cl
Effets respiratoires (volatiles)	kg éq. PM2.5
Effets respiratoires (particules)	Bq éq. C-14
Rayonnement ionisant	kg éq. CFC-11
Destruction de la couche d'ozone	kg éq. C2H4
Écotoxicité aquatique	kg TEG water
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil
Acide terrestre / nutriment	kg éq. SO2
Occupation de la terre	m2org.arable
Acidification aquatique	kg éq. SO2
Eutrophisation aquatique	kg PO4 P-lim
Changement climatique	kg éq. CO2
Énergie non renouvelable	MJ primary
Extraction des minerais	MJ surplus



info@fpinnovations.ca
www.fpinnovations.ca

NOS BUREAUX

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

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

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