
Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse multicritère du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment d'un point de vue écologique et économique

Auteur : Smets, Léa

Promoteur(s) : Attia, Shady; 22179

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/19543>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Analyse multicritère du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment d'un point de vue écologique et économique

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du
grade de master Ingénieur Civil Architecte par
Léa Smets

Promoteur : Prof. ATTIA Shady - SBD Lab
Mme DAUBE Florence – Helium 3

Jury : Pr. DE BOISSIEU Aurélie
Pr. COURARD Luc

Abstract

Following the Paris Agreement, Belgium committed to implementing environmental policies. Indeed, the Earth's surface has experienced a rise in temperatures since the 1900s, primarily attributed to greenhouse gases resulting from human activities. To date, Belgium has not yet established a threshold for equivalent carbon dioxide emissions. Nevertheless, there is an interest in reducing the environmental impact of the construction sector on the climate.

Helium 3 architecture firm is dedicated to designing positive architectures. Aware of the construction industry's impact on the environment, they strive to offer clients the most environmentally friendly solutions possible. For these reasons and to secure subsidies, they have committed to designing a positive energy building with an envelope composed of 95% bio-sourced insulators. Following their commitment, they aim to assess the environmental and economic impact of a case study according to five construction systems.

The aim of this research is to facilitate the selection of the construction system for building envelope walls through an analysis of their environmental and economic impact. This study is carried out during the Concept Design phase and is divided into two parts : the Life Cycle Assessment (LCA) and the cost study. Global Warming Potentials (GWP) are calculated via the LCA. This iterative process was conducted using three tools : One Click LCA, TOTEM, and Excel. Meanwhile, costs are estimated from a price list compiled based the average prices quoted by various contractors.

In terms of LCA, the results first allow for a comparison of these different tools in terms of data reliability, methods used, and accuracy. The LCA and the cost study are then conducted on two scales : the first at the building scale and the second at the wall scale. The results of each study are synthesised in a table in the form of hotspots and are then juxtaposed in various graphs. They allow us to identify the most advantageous walls according to environmental and economic themes and to formulate scenarios based on the project under study. Finally, the LCA results are compared to the thresholds set out in the French RE2020 standard.

These results lead to a series of findings, subsequently summarised as recommendations for designers. The strengths and weaknesses of this work are then listed before practical impacts are discussed. Finally, suggestions for future work are presented.

In conclusion, this study provides designers with an insight into the emissions and costs generated by a building according to five construction systems during the "Concept Design" phase.

Résumé

Suite à l'Accord de Paris, la Belgique s'est engagée à mettre en place des politiques environnementales. En effet, la surface terrestre connaît une augmentation des températures depuis les années 1900. Cette dernière est notamment due aux gaz à effet de serre liés aux activités humaines. Actuellement, en Belgique, aucun seuil d'émissions de dioxyde de carbone équivalent n'est pas encore mis en place. Néanmoins, l'intérêt de diminuer l'impact environnemental du secteur de la construction sur le climat est présent. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale qui vise à évaluer les impacts environnementaux des produits ou services durant l'ensemble de leur cycle de vie. La prise de conscience de l'impact du secteur de la construction sur le potentiel de réchauffement climatique depuis le début du 20^e siècle a permis à l'ACV de devenir l'outil incontournable pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments et des matériaux qui le composent (Khasreen et al., 2009). Dans ce secteur, l'ACV est un outil qui peut favoriser l'aide à la prise de décision. En effet, il permet notamment de comparer l'impact environnemental de différentes alternatives de conception afin de concevoir à partir de solutions les plus durables possible (Di Maria et al., 2020).

Le bureau d'architecture Helium 3 œuvre à concevoir des architectures positives. Conscients de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, ils ont à cœur de proposer aux clients des solutions les plus écologiques possibles. Pour ces raisons et afin d'obtenir des subsides, ils se sont engagés à concevoir un bâtiment à énergie positive dont l'enveloppe est composée de 95% d'isolants biosourcés. Suite à leur engagement, ils souhaitent pouvoir évaluer l'impact environnemental et économique d'un cas d'étude selon cinq systèmes constructifs. Le cas d'étude est une crèche qui sera implantée à Beaufays. Le bureau Helium 3 propose de développer le projet autour d'un concept fort qui retrace l'histoire du lieu, tout en étant ludique et pédagogique pour les enfants : « Ma crèche à la ferme ». Ce dernier oriente les choix de conception comme la volumétrie, les matériaux utilisés, etc. En raison de la destination du bâtiment, d'autres éléments guident également ces choix : les contraintes et législations liées à l'AFSCA et l'ONE notamment. Les cinq systèmes constructifs étudiés sont les suivants :

- Le cas de base en traditionnel.
- La variante une qui possède un système constructif mixte composé de parois en traditionnel et d'autres en ossature bois.
- La seconde variante est identique au cas de base à l'exception des isolants qui sont biosourcés. Elle est donc réalisée en traditionnel.
- La troisième est réalisée exclusivement en CLT.
- La quatrième comporte une ossature bois.

Le but de cette recherche est de faciliter le choix du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment par une analyse de leur impact environnemental et économique. Cette étude se fait à la phase Concept Design et est divisée en deux parties : l'ACV et l'étude du coût. Elles nécessitent toutes deux différents types de données tels un relevé de surface, les compositions des parois étudiées, les données environnementales de chaque matériau, un quantitatif de matériaux et un bordereau de prix. Ces données sont collectées notamment à partir d'une maquette numérique 3D simplifiée du cas d'étude, d'échanges avec le bureau d'architecture Helium 3 et avec des entrepreneurs ainsi que dans les bases de données disponibles sur le marché. La récolte de ces données permet d'entamer l'ACV et l'étude du coût. Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) est calculé via l'ACV. Ce processus itératif a été réalisé via trois outils ;

- L'outil One Click LCA avec comme données d'entrées les valeurs mentionnées dans les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES) de la base de données INIES.
- L'outil TOTEM avec comme données d'entrées les valeurs mentionnées dans les Déclarations Environnementales de Produits (DEP) issues de la base de données Ecoinvent 3.6 et B-EPD.
- L'outil Excel avec les mêmes données que pour l'outil One Click LCA.

Tandis que les coûts sont estimés à partir d'un bordereau de prix réalisé à partir des moyennes des offres de prix communiquées par différents entrepreneurs.

Au niveau de l'ACV, les résultats permettent tout d'abord de comparer ces différents outils d'un point de vue de la fiabilité des données, des méthodes utilisées et de la précision. Les différentes causes de variabilités sont énumérées et résumées dans un tableau. L'outil One Click LCA étant considéré comme le plus adapté dans cette étude, ces résultats sont ensuite analysés plus précisément. Deux analyses sont ensuite réalisées : la première à l'échelle du bâtiment et la seconde à l'échelle des parois. Un tableau résume l'ensemble des résultats de la seconde sous forme de hot spot. En termes de coût, les deux mêmes analyses que précédemment sont réalisées dans cette étude : la première à l'échelle du bâtiment et la seconde à l'échelle des parois. Un tableau rassemble également les résultats de l'étude du coût sous forme de hot spot. Les résultats de l'ACV et de l'étude du coût sont ensuite mis en parallèle dans différents graphiques. Cinq graphiques regroupent les résultats propres à chaque paroi et le dernier rassemble l'ensemble des résultats. Ils permettent d'identifier les parois les plus avantageuses selon ces deux thématiques et de créer des scénarios en fonction du projet étudié. Pour finir, les résultats de l'ACV sont comparés aux seuils imposés dans la norme française RE2020.

Ces résultats permettent de formuler une série de découvertes. Ils sont ensuite synthétisés sous forme de recommandations pour les concepteurs. Les forces et les faiblesses de ce travail sont ensuite énumérées avant que soient abordés les impacts pratiques. Enfin, des pistes de travaux futurs sont présentées.

En conclusion, cette étude permet aux concepteurs d'avoir un avant-goût des émissions et du coût engendré par un bâtiment selon cinq systèmes constructifs en phase de « Concept Design ». Elle contribue également à faciliter le choix de l'outil d'ACV et de la base de données utilisée dans une future étude.

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps adresser mes sincères remerciements à mon promoteur, Mr. Shady Attia, professeur à l'Université de Liège, pour l'encadrement, sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont contribué à l'élaboration de ce travail de fin d'étude.

Au même titre, je souhaite remercier ma co-promotrice, Mme. Florence Daube, ingénieur architecte dans le bureau d'architecture Helium 3, pour m'avoir orientée et conseillée durant cette recherche.

Je tiens également à gratifier les membres du SBD Lab., sans qui des feedbacks enrichissants sur l'état d'avancement de cette recherche, à travers l'organisation de colloques, n'auraient pas été possibles.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à l'ensemble de l'équipe d'Helium 3 pour leur accueil, le temps qu'ils m'ont consacré et leur partage de connaissances.

Enfin, je suis très reconnaissante envers les personnes qui ont accepté de me rencontrer et qui m'ont accordé de leur temps afin de répondre à mes questions et qui ont contribué à alimenter cette recherche.

Abréviations

ABEX	Association Belge des Experts
ACV ou LCA	Analyse du Cycle de Vie (Life Cycle Assessment)
AFSCA	Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire
AGW	Arrêté du Gouvernement Wallon
B-EPD	Belgium Environmental Declaration Product (Déclaration Environnementale Belge du Produit)
BIM	Building Information Modeling (Modélisation des Données du Bâtiment)
Capex	Capital Expenditure
CCV	Coût du Cycle de Vie
CEN	Comité Européen de Normalisation
CLT	Cross Laminated Timber (Bois Laminé Croisé)
CO ₂ eq	Dioxyde de carbone équivalent
COP	Conference Of the Parties (Conférence des Parties)
COPRAS	COmplex PRoportional ASsessment
DEP (ou EPD)	Déclaration Environnementale de Produit (ou Environmental Declaration Product)
DVR	Durée de Vie de Référence
FDES	Fiche de Déclarations Environnementales et Sanitaires
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IFC	Industry Foundation Classes
ISO	International Organization for Standardization (Organisme international de normalisation)
MMG	Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw elementen (impact matériel des éléments de construction sur l'environnement)
ODD	Objectifs de Développement Durable
ONE	Office de la Naissance et de l'Enfance
ONU	Organisation des Nations Unies
OSB	Oriented Strand Board (Panneau de particules orientées)
OVAM	Organisme public pour la gestion des déchets en Région flamande
PEB	Performance Énergétique des Bâtiments

PEF	European Product Environmental Footprint
PIR	Polyisocyanurate
PMR	Personne à mobilité réduite
PRG ou GWP	Potentiel de Réchauffement Global (Global Warming Potential)
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PUR	Polyuréthane
Q-ZEN ou NZEB	Quasi Zéro Énergie ou Nearly Zero Energy Building
RE2020	Réglementation Environnementale 2020
RIBA	Royal Institute of British Architects (Institut royal des architectes britanniques)
SBD Lab	Sustainable Building Design Laboratory
SPU	Surface de Plancher Utile
SPW	Service Public de Wallonie
TOTEM	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
UE	Union Européenne
UF	Unité Fonctionnelle
UPA	Union Professionnelle d'Architectes
USA	United States of America (États-Unis d'Amérique)

Table des matières

Abstract	iii
Résumé	v
Remerciements	vii
Abréviations	ix
Table des matières	xi
Liste des Figures	xv
Liste des Tableaux	xvii
1 Introduction	1
1.1 <i>Contexte</i>	1
1.2 <i>Problématique</i>	3
1.3 <i>Objectifs et but de la recherche</i>	3
1.4 <i>Audience / Valeur ajoutée</i>	4
1.5 <i>Objectifs de Développement Durable (ODD)</i>	5
1.6 <i>Questions et sous-questions de recherche</i>	5
2 État de l’art	7
2.1 <i>État de l’art des théories et concepts de l’étude</i>	7
2.1.1 Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).....	7
2.1.2 L’Accord de Paris	8
2.1.3 L’engagement européen	8
2.1.4 Les réglementations nationales.....	9
2.1.5 Analyse du cycle de vie (ACV)	11
2.2 <i>Concepts et variables de la recherche</i>	21
2.2.1 Déclaration environnementale du produit (DEP)	21
2.2.2 Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)	21
2.2.3 Unité fonctionnelle (UF).....	22
2.2.4 Durée de vie de référence (DVR).....	22
2.2.5 Potentiel de réchauffement global (PRG).....	22
2.2.6 Surface brute de plancher.....	23
2.3 <i>Études similaires et gap scientifique</i>	23
2.3.1 Conclusion.....	32
3 Méthodologie	33
3.1 <i>Processus du mémoire</i>	33
3.2 <i>Cadre conceptuel de l’étude</i>	34

3.3	<i>Variables et indicateurs</i>	36
3.4	<i>Collecte des données</i>	38
3.4.1	One Click LCA et Excel – INIES	40
3.4.2	TOTEM – Ecoinvent et B-EPD	40
3.5	<i>Évaluation de la qualité des données</i>	41
3.6	<i>Traitement et analyse des données</i>	43
3.6.1	Analyse du Cycle de Vie (ACV).....	43
3.6.2	Étude du coût	44
3.7	<i>Hypothèses de l'étude</i>	45
3.7.1	La durée de référence du bâtiment (DVR)	45
3.7.2	Indicateurs environnementaux.....	45
3.7.3	Les étapes du cycle de vie.....	45
3.7.4	Le coefficient de transfert thermique.....	46
3.7.5	Phase de projet	46
4	Cas d'étude et systèmes constructifs	47
4.1	<i>Contexte</i>	47
4.2	<i>Site et implantation</i>	47
4.3	<i>Contraintes et législations spécifiques</i>	50
4.4	<i>Techniques spéciales</i>	50
4.5	<i>Programme et aménagement intérieur</i>	50
4.6	<i>Problématique des isolants biosourcés</i>	52
4.7	<i>Système constructif du cas de base et des variantes</i>	52
4.7.1	Cas de base : Ossature traditionnelle avec isolant classique	53
4.7.2	Variante 1 : Système constructif mixte	53
4.7.3	Variante 2 - Ossature traditionnelle avec isolant biosourcé	53
4.7.4	Variante 3 - Ossature en CLT.....	53
4.7.5	Variante 4 - Ossature en bois.....	54
4.8	<i>Conclusion</i>	54
5	Résultats	55
5.1	<i>ACV en fonction du système constructif et de l'outil utilisé</i>	55
5.1.1	Analyse des résultats	55
5.1.2	Potentielles causes de la variabilité des résultats.....	57
5.1.3	Résumé.....	59
5.2	<i>ACV en fonction du système constructif et du type de parois</i>	61
5.3	<i>Étude du coût en fonction du système constructif et du type de parois</i>	65
5.4	<i>Mise en parallèle des résultats de l'ACV et de l'étude du coût</i>	68
5.5	<i>Comparaison des résultats de l'ACV à la réglementation</i>	71
6	Discussion	73
6.1	<i>Découvertes principales</i>	73

6.2	<i>Recommandations</i>	73
6.3	<i>Forces</i>	74
6.4	<i>Faiblesses</i>	75
6.5	<i>Impact pratique</i>	76
6.6	<i>Travaux futurs</i>	77
7	Conclusions	79
8	Références	83
9	Annexes	91
9.1	<i>Annexe 1 : Compositions de parois du cas de base</i>	93
9.2	<i>Annexe 2 : Compositions de parois de la variante 1 – Mixte</i>	94
9.3	<i>Annexe 3 : Compositions de parois de la variante 2 – Traditionnel + isolant biosourcé</i>	95
9.4	<i>Annexe 4 : Compositions de parois de la variante 3 – CLT</i>	96
9.5	<i>Annexe 5 : Compositions de parois de la variante 4 – Ossature bois</i>	97
9.6	<i>Annexe 6 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur Excel en fonction du système constructif et du type de parois</i>	98
9.7	<i>Annexe 7 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur One Click LCA en fonction du système constructif et du type de parois</i>	99
9.8	<i>Annexe 8 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur TOTEM en fonction du système constructif et du type de parois</i>	100
9.9	<i>Annexe 9 : Résumé des résultats de l'ACV du cas de base en fonction des matériaux</i>	101
9.10	<i>Annexe 10 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 1 en fonction des matériaux</i>	102
9.11	<i>Annexe 11 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 2 en fonction des matériaux</i>	103
9.12	<i>Annexe 12 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 3 en fonction des matériaux</i>	104
9.13	<i>Annexe 13 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 4 en fonction des matériaux</i>	105
9.14	<i>Annexe 14 : Résumé des résultats de l'étude du coût en fonction du système constructif et du type de parois</i>	106
9.15	<i>Annexe 15 : Bordereau de prix</i>	107
9.16	<i>Annexe 16 : Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude</i>	108
9.17	<i>Annexe 17 : Plan du 1^{er} étage du cas d'étude</i>	109
9.18	<i>Annexe 18 : Plan du 2^e étage du cas d'étude</i>	110
9.19	<i>Annexe 19 : Coupes longitudinales du cas d'étude</i>	111

9.20	<i>Annexe 20 : Coupes transversales du cas d'étude</i>	112
9.21	<i>Annexe 21 : Compositions de parois du cas de base</i>	113
9.22	<i>Annexe 22 : Compositions de parois de la variante 1</i>	114
9.23	<i>Annexe 23 : Compositions de parois de la variante 2</i>	115
9.24	<i>Annexe 24 : Compositions de parois de la variante 3</i>	116
9.25	<i>Annexe 25 : Compositions de parois de la variante 4</i>	117
9.26	<i>Annexe 26 : Certificat Label Produit Bio-sourcé - KENOVEL</i>	118
9.27	<i>Annexe 27 : SDB Poster</i>	119

Liste des Figures

Figure 1.1 - Objectif de l'Accord de Paris (Climate Watch, 2022).....	1
Figure 1.2 - Gaz à effet de serre global par secteur pour l'année 2016 (Ritchie, 2020)	2
Figure 2.1 - Répartition des émissions entre les différents secteurs en 2021 (%) (Liang et al., 2023)	7
Figure 2.2 - Les étapes d'évaluation de l'ACV (Chen et al., 2023)	13
Figure 2.3 - Principe de calcul des impacts environnementaux (Cabassud, 2020)	15
Figure 2.4 - Les différentes phases de l'ACV d'un bâtiment (CEN, 2012).....	15
Figure 2.5 - Capacité d'influencer les émissions aux différentes étapes du processus de conception (Bruce-Hyrkäs et al., 2018)	16
Figure 2.6 - Aperçu des huit étapes du RIBA Plan of Work (RIBA, 2020).....	17
Figure 2.7 - Aperçu des étapes du cycle de vie provenant des standards européens (CEN, 2012). TOTEM considère les modules colorés en vert. (Trigaux & Lam, 2023).....	18
Figure 2.8 - Relation entre les étapes du cycle de vie du bâtiment et les deux composants carbone (Liang et al., 2023)	21
Figure 3.1 - Organigramme de la méthodologie	34
Figure 3.2 - Exemple du Template One Click LCA (One Click LCA, s. d.)	43
Figure 3.3 - Exemple de dalle de sol proposée dans la bibliothèque TOTEM (TOTEM, s. d.)	44
Figure 3.4 - Les différentes phases de l'ACV d'un bâtiment (CEN, 2012) considérées dans cette étude	45
Figure 4.1 - Plan du site du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).....	47
Figure 4.2 - Schémas d'implantation 1 et 2 du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2022).....	48
Figure 4.3 - Schémas d'implantation 3 et 4 du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2022).....	49
Figure 4.4 - Modélisation 3D du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a)	49
Figure 4.5 - Schémas d'organisation intérieure du cas d'étude.....	51
Figure 4.6 - Mise en évidence des parois étudiées.....	52
Figure 5.1- Comparaison des résultats du PRG en fonction du système constructif et de l'outil d'ACV (kgCO ₂ eq/m ² SPU).....	56
Figure 5.2 - Comparaison du PRG total des différents systèmes constructifs (kgCO ₂ eq).....	61
Figure 5.3 - Comparaison du PRG des différents types de parois en fonction du système constructif (kgCO ₂ eq/m ²).	62
Figure 5.4 - Comparaison du coût total des différents systèmes constructifs (€)	65
Figure 5.5 - Comparaison du coût des différents types de parois en fonction du système constructif (€/m ²)	65
Figure 5.6 - Mise en parallèle des résultats du PRG (kgCO ₂ eq/m ²) et des coûts (€/m ²) en fonction du système constructif et du type de parois.....	69
Figure 5.7 - Mise en parallèle des résultats du PRG (kgCO ₂ eq/m ²) et des coûts (€/m ²) en fonction du système constructif et du type de parois.....	70
Figure 5.8 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020 pour les bâtiments scolaires	71
Figure 5.9 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020 pour les maisons individuelles ou accolées	72
Figure 9.1 - Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude	108
Figure 9.2 - Plan du R+1 du cas d'étude.....	109
Figure 9.3 - Plan du R+2 du cas d'étude.....	110
Figure 9.4 - Coupes longitudinales du cas d'étude	111
Figure 9.5 - Coupes transversales du cas d'étude.....	112
Figure 9.6 - Compositions de parois du cas de base - Ossature traditionnelle avec isolant classique.....	113
Figure 9.7 - Compositions de parois de la variante 1 - Traditionnel.....	114

Figure 9.8 - Compositions de parois de la variante 2 – Traditionnel + isolant biosourcé	115
Figure 9.9 - Compositions de parois de la variante 3 – CLT	116
Figure 9.10 - Compositions de parois de la variante 4 – Ossature bois	117
Figure 9.11 - Certificat Label Produit Biosourcé du liège KENOVEL	118
Figure 9.12 - SDB Poster	119

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 - Synthèse des normes de l'ACV	12
Tableau 2.2 - Indicateurs décrivant les impacts environnementaux (CEN, 2012)	14
Tableau 2.3 - Synthèse des études similaires.....	29
Tableau 3.1 - Définition du système constructif des parois de l'enveloppe du cas de base et des variantes.....	36
Tableau 3.2 – Variables de l'étude.....	37
Tableau 3.3 - Relevé des surfaces de parois.....	38
Tableau 3.4 – Les cinq indicateurs de qualité des données définis par Weidema & Wesnaes (Castagné, 2023).....	41
Tableau 3.5 - Critère de qualité de l'analyse du cycle de vie des trois outils d'ACV.....	41
Tableau 5.1 - Comparaison des logiciels d'ACV.....	60
Tableau 5.2 - Tableaux comparatifs du PRG (kgCO ₂ eq/m ²) des variantes par rapport au cas de base	63
Tableau 5.3 - Tableaux comparatifs du coût (€/m ²) des variantes par rapport au cas de base	67
Tableau 9.1 - Composition des parois du cas de base.....	93
Tableau 9.2 - Composition des parois de la variante 1 - Mixte.....	94
Tableau 9.3 - Composition des parois de la variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	95
Tableau 9.4 - Composition des parois de la variante 3 - CLT.....	96
Tableau 9.5 - Composition des parois de la variante 4 - Ossature bois	97
Tableau 9.6 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur Excel au mètre carré (kgCO ₂ eq/m ²), par type de parois (kgCO ₂ eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO ₂ eq) du cas de base et de chaque alternative.....	98
Tableau 9.7 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur One Click LCA au mètre carré (kgCO ₂ eq/m ²), par type de parois (kgCO ₂ eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO ₂ eq) du cas de base et de chaque alternative	99
Tableau 9.8 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur TOTEM au mètre carré (kgCO ₂ eq/m ²), en fonction du système constructif pour chaque type de parois (kgCO ₂ eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO ₂ eq)	100
Tableau 9.9 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux du cas de base et de l'outil utilisé (kgCO ₂ eq/m ²)	101
Tableau 9.10 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 1 et de l'outil utilisé (kgCO ₂ eq/m ²)	102
Tableau 9.11 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 2 et de l'outil utilisé (kgCO ₂ eq/m ²)	103
Tableau 9.12 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 3 et de l'outil utilisé (kgCO ₂ eq/m ²)	104
Tableau 9.13 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 4 et de l'outil utilisé (kgCO ₂ eq/m ²)	105
Tableau 9.14 - Résumé des résultats de l'étude du coût au mètre carré (kgCO ₂ eq/m ²), en fonction du système constructif pour chaque type de parois (kgCO ₂ eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO ₂ eq)	106
Tableau 9.15 - Résumé des coûts à l'unité des matériaux pose comprise	107

1 Introduction

1.1 Contexte

Depuis les années 1900, nous connaissons une augmentation considérable des températures à la surface du globe. Cette dernière est principalement due aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées aux activités humaines qui ne cessent de croître (GIEC, 2023). Une série de changements liés à ce phénomène ont été observés, et des conséquences parfois déjà inévitables et de plus en plus difficiles à gérer sont à craindre (GIEC, 2023).

Au niveau mondial, l'émission de GES annuelle correspond à 50 milliards de tonnes d'équivalents de dioxyde de carbone (CO₂eq) (Ritchie, 2020). Cette unité est une unité commune créée par le GIEC, un Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat, afin de pouvoir comparer les différents GES. Ces derniers sont différenciés par la quantité de rayonnement qu'ils possèdent ainsi que par la durée durant laquelle ils restent dans l'atmosphère (Corradi, 2022).

Afin de réduire les émissions de GES mondiales, et ce, de manière significative, le premier accord international sur le climat a été adopté en décembre 2015, l'Accord de Paris. Suite à cet Accord, les 196 Parties signataires se sont engagées à mettre en place des politiques afin de devenir climatiquement neutres d'ici à 2050. Les efforts tendent à limiter l'augmentation de la température à 1,5°C (Climat.be, 2023).

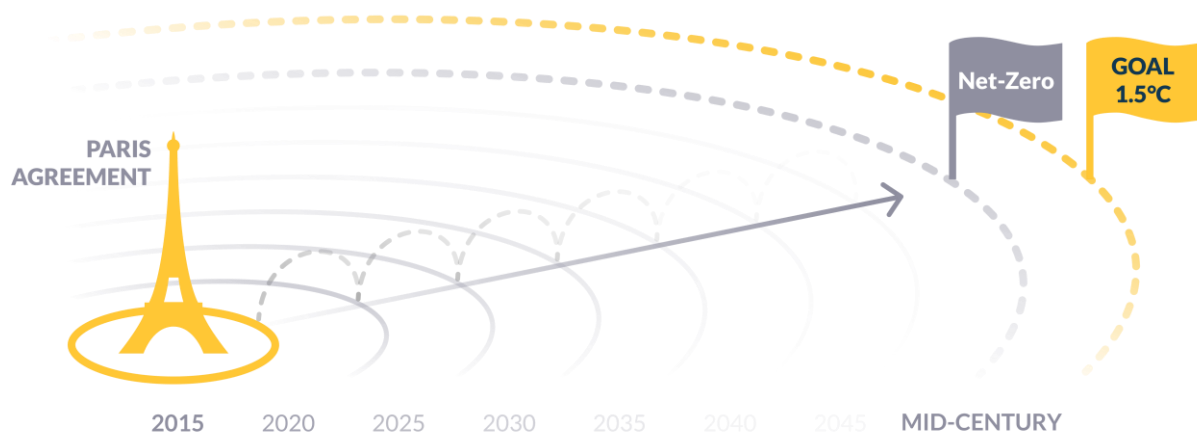


Figure 1.1 - Objectif de l'Accord de Paris (Climate Watch, 2022)

Pour ce faire, les émissions de GES mondiales doivent diminuer, et ce, le plus rapidement possible. Le graphe suivant met en évidence que les émissions de GES proviennent de différents secteurs. Intervenir sur un seul de ceux-ci n'est pas suffisant. De multiples solutions doivent être trouvées afin de lutter contre le réchauffement climatique.

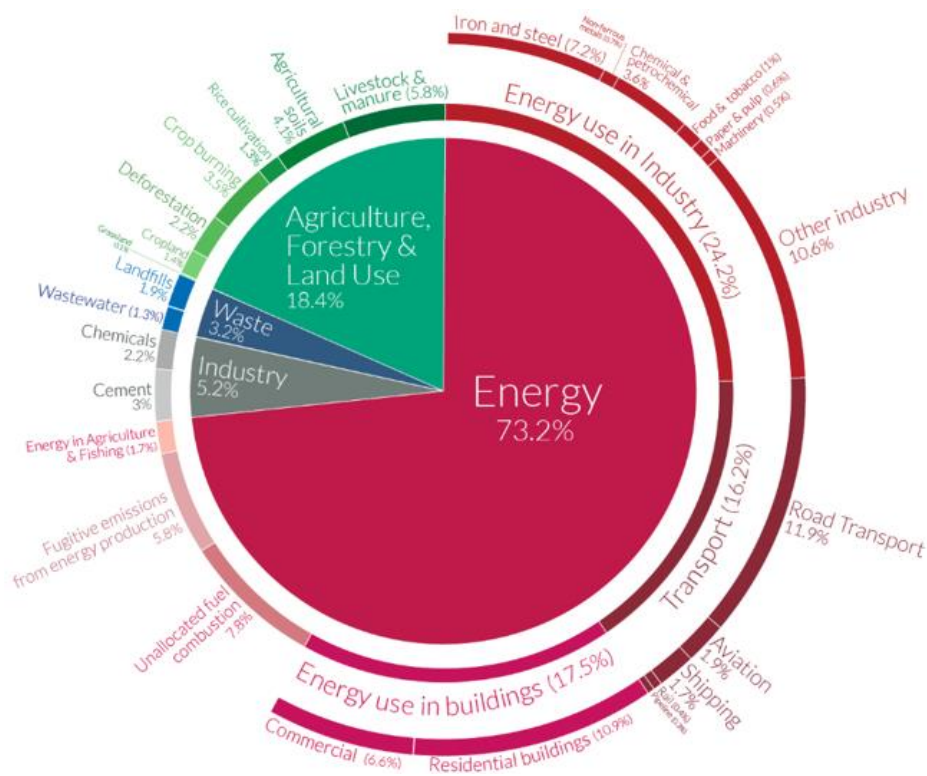


Figure 1.2 - Gaz à effet de serre global par secteur pour l'année 2016 (Ritchie, 2020)

C'est dans ce cadre que s'est déroulé, en 2018, en Belgique, le débat national sur la tarification carbone. En effet, la Belgique est tenue de prendre des mesures afin de respecter ces engagements et encourager la transition vers une énergie à faible émission de carbone. La mise en place d'une telle tarification inciterait les consommateurs à adapter leurs attitudes et comportements au bénéfice de solutions qui permettraient de diminuer les niveaux d'émissions de GES. Deux secteurs ont été pointés du doigt : le secteur du transport et le secteur du bâtiment (Climat.be, 2023).

Au niveau national, la Belgique est le 57^e émetteur de GES mondial avec 100,27 millions de tonnes métriques d'équivalent CO₂ (MtCO₂eq) émises durant l'année 2020 contre 109,17 MtCO₂eq en 2018 (Climate Watch, 2022).

Actuellement, en Belgique, aucune valeur n'a encore été imposée. Cependant, en France, a été mise en place une Réglementation Environnementale (RE2020), qui impose des seuils à ne pas dépasser. Comme mentionné dans ce guide, « Il s'agit de la première réglementation française, et une des premières mondiales, à introduire la performance environnementale dans la construction neuve via l'analyse en cycle de vie » (Cabassud, 2020). Elle a 3 objectifs :

1. « Poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et la baisse des consommations des bâtiments neufs » (Cabassud, 2020, p. 24).
2. « Diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs (...). Ceci permet d'inciter à des modes constructifs qui émettent peu de gaz à effet de serre ou qui permettent d'en stocker tels que le recours aux matériaux biosourcés » (Cabassud, 2020, p. 24).
3. « Garantir aux habitants que leur logement sera adapté en cas de forte chaleur (...) » (Cabassud, 2020, p. 24).

Dans le cadre de cette recherche, les valeurs imposées par la RE2020 sont prises comme valeurs de référence. En effet, même si cette norme concerne la France et pas la Belgique, cette dernière devra un jour satisfaire à de telles exigences afin d'atteindre ces objectifs d'ici à 2050. Une démarche avant-gardiste est adoptée dans cette recherche afin de se préparer aux futures réglementations.

Enfin, cette recherche se concentre sur le second objectif de la RE2020, qui concerne l'impact sur le climat des émissions générées durant le cycle de vie des bâtiments neufs et du recours aux matériaux et aux isolants exclusivement biosourcés.

1.2 Problématique

Dans le cadre du Plan Équilibre 2021-2026 financé par l'Union européenne (UE), la Région Wallonne a lancé un appel à projets en mai 2022. Le projet de création d'une nouvelle crèche, conçu par le bureau d'architecture Helium 3 et introduit par la commune de Chaudfontaine, a été sélectionné afin d'être réalisé et d'ouvrir des places d'ici fin août 2026 au plus tard. Pour ce faire, différentes performances environnementales doivent être respectées. Parmi elles, l'atténuation du changement climatique, l'adaptation à ce dernier et la mise en œuvre d'éco-matériaux pour l'isolation, à hauteur de minimum 60% des parois de l'enveloppe chauffée du bâtiment (hors menuiseries extérieures).

Lors du dépôt des candidatures, la commune de Chaudfontaine a décidé de respecter des exigences supérieures afin d'augmenter ses chances d'être sélectionnée. Elle s'est donc engagée à utiliser 95% d'éco-matériaux et à concevoir un projet zéro énergie. Mais, si les objectifs ne sont pas atteints, cela aura des répercussions sur les subsides octroyés.

Suite à ces restrictions et conscient de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, le bureau d'architecture Helium 3 souhaite que je réalise une analyse chiffrée concrète de l'impact environnemental et du coût des différentes parois du volume protégé du bâtiment. Cette analyse comparera trois types d'ossatures : l'ossature en bois, en bois laminé croisé ou Cross Laminated Timber (CLT) et en traditionnel.

Le bureau Helium 3, conscient des différences de coût de chaque type de parois, souhaite que je réalise également une analyse chiffrée du coût des différentes parois du volume protégé du bâtiment, selon ces trois mêmes types de parois. L'idée est de mettre en parallèle ces deux analyses.

1.3 Objectifs et but de la recherche

L'objectif de cette recherche est de quantifier l'impact environnemental et budgétaire du choix du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment en phase de « Concept Design ». L'intérêt est de préparer les concepteurs de bâtiment à s'adapter aux futures réglementations belges. L'étude des résultats de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et du coût leur permet de se familiariser avec les ordres de grandeur des impacts environnementaux et économiques qu'engendre chaque type de parois en fonction de son système constructif. Ils peuvent ainsi identifier sans peine la variante optimale et la variante la plus défavorable d'une part d'un point de vue environnemental et d'autre part d'un point de vue économique.

Par la suite, en mettant en parallèle ces deux problématiques, l'étude permet d'évaluer les conséquences d'un choix de système constructif pour ses atouts environnementaux, par exemple, par rapport à l'autre critère étudié. Ainsi, les concepteurs et les maîtres d'ouvrages pourront aisément quantifier les impacts de leur choix et identifier les alternatives possibles.

1.4 Audience / Valeur ajoutée

Cette recherche est tout d'abord destinée au bureau Helium 3 qui a conçu le projet d'étude. Ce dernier œuvre à concevoir des architectures positives. Conscient de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, le bureau peut être orienté vers des pistes de réflexions pour leurs futurs projets.

Cette étude s'adresse également aux concepteurs du bâtiment, tels que les architectes et les ingénieurs, à qui sont confiées les missions d'aspect environnemental. En effet, cette recherche donne la possibilité d'avoir un aperçu rapide de l'impact environnemental et économique d'un projet en phase Concept Design, avant de se lancer dans des démarches plus complexes et précises, via un outil d'ACV détaillé à une phase ultérieure dans le processus de conception.

De plus, elle peut leur permettre de conscientiser les maîtres d'ouvrages sur les conséquences environnementales de leur choix de système constructif, tout en évaluant en parallèle l'impact budgétaire.

Enfin, cette analyse est également dédiée directement aux maîtres d'ouvrages soucieux de l'aspect environnemental, afin qu'ils puissent quantifier les impacts budgétaires et environnementaux des différentes alternatives qui s'offrent à eux.

En ce qui concerne la valeur ajoutée, d'une part, cette étude permet la prise en main du projet au début du processus de conception, en phase « Concept Design », comme nommé dans le plan de travail de l'Institut Royal des Architectes Britanniques ou Royal Institute of British Architects (RIBA). Cette étape correspond à la phase où le concept architectural est validé par le client (RIBA, 2020). Comme selon la RE2020, les nouvelles constructions doivent être évaluées deux fois durant le processus, une fois en phase permis de construire et une fois en phase achèvement des travaux (Cabassud, 2020), cette recherche permet d'anticiper ces futures évaluations en guidant les choix des concepteurs. Cette analyse avant-gardiste donne donc la possibilité de mettre rapidement en évidence des résultats sur les choix opérés, afin de concevoir un projet capable de respecter les exigences imposées.

D'autre part, cette étude met en parallèle le coût environnemental et budgétaire, laissant chacun mettre le curseur au niveau souhaité. Peu d'études établissent un parallèle entre ces deux thématiques. Elle permet au maître d'ouvrage et aux concepteurs de choisir un ou plusieurs systèmes constructifs en connaissant leurs impacts.

1.5 Objectifs de Développement Durable (ODD)

Cette recherche, intitulée « Analyse multicritères du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment d'un point de vue écologique et économique », s'inscrit dans deux des 17 Objectifs de Développement Durable (ODD), adoptés par les Nations-Unies en 2015 et mis en place entre autres afin de protéger la planète. (PNUD, 2023) :

Premièrement dans l'Objectif 11 « Villes et communautés durables » et plus particulièrement dans la cible qui mentionne le renforcement de l'urbanisation durable d'ici à 2030 (PNUD, 2023).

Deuxièmement dans l'Objectif 13 « Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques » et notamment dans la cible « Incorporer des mesures relatives aux changements climatiques dans les politiques, les stratégies et la planification nationales » (PNUD, 2023).

1.6 Questions et sous-questions de recherche

La question de recherche qui découle de la problématique et du contexte actuel est la suivante :

Comment faciliter la comparaison de différentes techniques de construction durable au stade « Concept Design » d'un point de vue environnemental et économique pour les architectes soucieux de l'intégration environnementale ?

Deux sous-questions de recherche en découlent :

1. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue environnemental ?
2. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue économique ?

2 État de l'art

Cette Section définit le contexte, les théories et les concepts de l'étude. Une attention particulière est portée sur le cadre réglementaire dont elle bénéficie. Ensuite, les variables de l'étude ainsi que les recherches similaires sont présentées.

2.1 État de l'art des théories et concepts de l'étude

2.1.1 Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES)

De nos jours, de nombreux dommages dévastateurs, tels que l'élévation du niveau de la mer, la multiplication des feux de forêt, l'extinction de certaines espèces, de longues périodes de sécheresse et bien d'autres encore, témoignent de l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre (Wang et al., 2021). Cette dernière est due aux émissions de GES liées aux activités humaines, dont l'urbanisation et l'industrialisation mondiale (Chen et al., 2022). Afin de limiter la concentration mondiale de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et par conséquent la hausse de la température, des mesures drastiques doivent être prises. Sinon, les conséquences du changement climatique ne feront que s'amplifier (Wang et al., 2021) et l'augmentation de la température moyenne mondiale pourrait atteindre d'ici à 2100 jusqu'à 5,7°C de plus qu'en 1900 (GIEC, 2023).

En 2018 a eu lieu la Conférence des Parties (COP) 24. Lors de ce sommet international, l'Organisation des Nations-Unies (ONU) a déclaré qu'à l'échelle mondiale, les émissions de CO₂ liées au secteur de la construction valaient 40% des émissions totales (CCNUCC, s. d.). Celles-ci sont notamment dues à la grande quantité de matière première, à la forte consommation d'énergie que nécessite ce secteur ainsi qu'aux activités de construction qui en découlent (Vasishta et al., 2023). En conséquence, l'intérêt de se concentrer sur la réduction de ces émissions durant l'ensemble du cycle de vie des bâtiments est grandissant.

La Figure suivante présente la répartition des émissions de carbone dans chaque secteur.

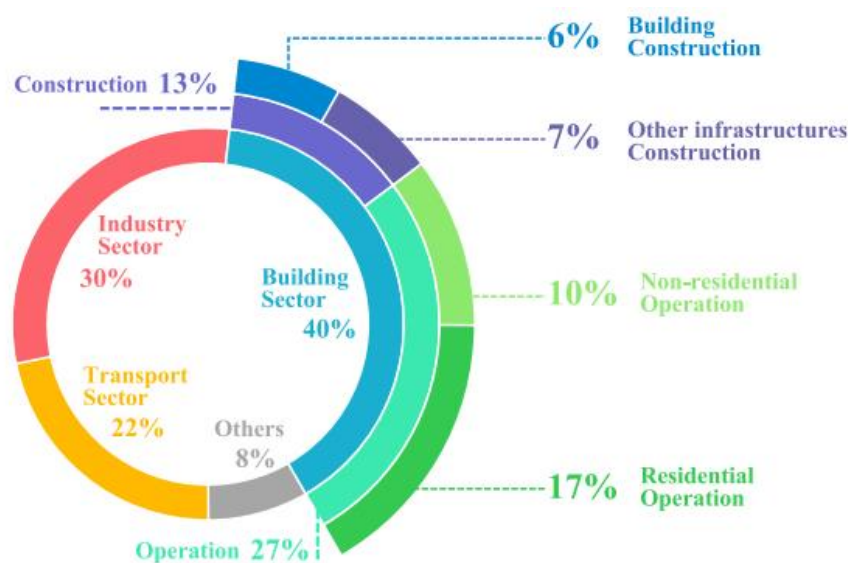


Figure 2.1 - Répartition des émissions entre les différents secteurs en 2021 (%) (Liang et al., 2023)

Telles que définies dans la Section 2.1.5.7, les émissions mondiales de carbone incorporé représentent 30% des émissions engendrées par le secteur de la construction. Elles proviennent en grande partie des phases de production et de construction du cycle de vie du bâtiment. Ces dernières correspondent aux phases A1 à A5 comme décrites dans la norme européenne CEN 15978 (CEN, 2012). Malgré le rôle que les émissions intrinsèques jouent dans le réchauffement climatique, leur diminution n'a pas toujours été une priorité pour les décideurs politiques et les entreprises. En effet, ces derniers se concentrent essentiellement sur la réduction des émissions opérationnelles qui sont quant à elles liées à l'utilisation du bâtiment durant son cycle de vie (Le Den et al., 2023).

2.1.2 L'Accord de Paris

La lutte contre le changement climatique est accompagnée depuis 1995 par l'organisation de COP. Lors de ce sommet mondial, qui a lieu chaque année sous l'égide de l'ONU, les pays du monde entier se réunissent afin de prendre des décisions pour lutter contre le changement climatique. La COP21 fait partie des COP les plus importantes. En effet, lors de cette dernière l'Accord de Paris a été adopté en décembre 2015 mais n'est entré en vigueur qu'en 2016 (Ministère Écologie Énergie Territoires, 2022).

L'United Nations Climate Change définit l'Accord de Paris comme étant « un traité international juridiquement contraignant sur les changements climatiques ». Suite à cet Accord, les 196 Parties signataires se sont engagées à mettre en place des politiques environnementales afin de devenir climatiquement neutres d'ici à 2050. Les efforts visent à limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale en dessous de 2°C, tout en continuant les efforts afin de limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5°C (CCNUCC, s. d.).

2.1.3 L'engagement européen

En 2010, l'UE a émis une directive (2010/31/UE) qui détaille les grandes lignes d'action et fixe des seuils minimums à atteindre en termes de performance énergétique pour l'ensemble de ses pays membres. Ces derniers se voient contraints de mettre en place des politiques nationales afin d'arriver à des bâtiments dont l'énergie consommée est presque nulle. La directive impose que tout nouveau bâtiment public doit répondre à ces exigences à partir de 2019. Toutes autres nouvelles constructions y seront contraintes à partir de 2021. Par conséquent, l'UE a défini de manière législative le concept de bâtiment à consommation d'énergie quasi nulle comme étant : « un bâtiment qui a des performances énergétiques très élevées [...]. La quantité quasi nulle ou très basse d'énergie requise devrait être couverte dans une très large mesure par l'énergie produite à partir de sources renouvelables, notamment l'énergie produite à partir de sources renouvelables sur place ou à proximité » (Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne, 2010). De plus, en 2020, suite à un vote, le Parlement européen s'est engagé à diminuer les émissions de GES de 60% par rapport à celles de 1990, d'ici à 2030 (ECEEE, 2020).

2.1.4 Les réglementations nationales.

Malgré les différentes normes qui encadrent l'ACV, telles que décrites dans la Section 2.1.5.1., elle n'est pas obligatoire en Europe. Néanmoins, certains pays tels que la France et le Danemark ont mis en place une réglementation nationale afin de rendre obligatoire l'évaluation environnementale dans le secteur de la construction. Ces dernières sont décrites ci-après.

En **Belgique**, depuis 2010, la Wallonie dispose d'une réglementation sur la Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) qui impose des exigences afin de réduire la consommation d'énergie primaire des bâtiments. Elle concerne tant les bâtiments neufs que ceux à rénover et prend en considération différents facteurs tels que le niveau d'isolation thermique, l'étanchéité à l'air, le recours aux sources d'énergie renouvelable et bien d'autres encore (SPW, 2021).

Cette réglementation découle de différents actes officiels qui sont présentés ci-dessous (SPW, 2021) :

- Le protocole de Kyoto : il a été adopté en 1997 lors de la COP3 à Kyoto et aspirait à diminuer les émissions de GES de 5% dans un certain délai dans les pays industrialisés.
- L'objectif 20-20-20 : il s'agit d'un plan d'action établi par les pays membres de l'UE. Il comprend trois objectifs à atteindre d'ici à 2020 : diminuer les émissions de CO₂ de 20%, augmenter à 20% la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique européen et améliorer de 20% l'efficacité énergétique.
- La directive européenne (2010/31/UE) : celle-ci, adoptée en 2010, détaille les grandes lignes d'action et les résultats attendus en termes de PEB. Elle concerne tous les pays membres de l'UE.
- Le décret régional : ce décret de 2013 vise à transposer la directive européenne relative à la PEB à un niveau régional.
- L'Arrêté du Gouvernement Wallon (AGW) : Ce dernier a été rédigé en 2014 mais a connu certaines modifications en 2016. Comme mentionné par le SPW, il définit « les procédures administratives, la méthode de calcul et les exigences, les agréments, les sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments. »
- Les arrêtés ministériels : Ils tendent à préciser certains éléments de l'AGW.

Au cours des années, les exigences PEB fixées par l'AGW en 2014 ont été endurcies. De plus, depuis 2021, de nouvelles exigences en termes de performance énergétique imposées par l'UE doivent être respectées pour la construction de bâtiments neufs. La notion de bâtiment à quasi zéro énergie est ainsi entrée dans la législation. Ce standard de performance énergétique succède à la réglementation PEB 2017 et est nommé « Quasi Zéro Énergie (Q-ZEN) » ou « Nearly Zero Energy Building (NZEB) » (Demesmaecker, 2019). Toutefois, malgré l'urgence de diminuer l'impact du secteur de la construction sur le réchauffement climatique, la Belgique n'impose encore actuellement aucune réglementation en termes d'émissions de GES.

En **France**, la réglementation environnementale des bâtiments neufs, nommée RE2020, a été rédigée à l'initiative du Ministère de la Transition Écologique dans l'objectif de réglementer la consommation d'énergie et les émissions de carbone (Cabassud, 2020).

La RE2020 concerne les bâtiments destinés à être habités, les bureaux et les bâtiments de l'enseignement primaire et secondaire. Elle s'établit sur l'évaluation de six indicateurs dont des seuils limites sont imposés. Deux d'entre eux portent sur les émissions de carbone (Cabassud, 2020) :

1. L' $I_{\text{Cénergie}}$ évalue l'impact sur réchauffement climatique de la consommation d'énergie primaire. Cet indicateur s'exprime en kilos de dioxyde de carbone équivalent par mètre carré ($\text{kgeq.CO}_2/\text{m}^2$) (Cabassud, 2020).
2. L' $I_{\text{Cconstruction}}$ évalue l'impact sur réchauffement climatique des produits de construction, des équipements ainsi que la façon dont ils sont mis en œuvre (Cabassud, 2020).

La RE2020 impose une double évaluation des bâtiments neufs : la première doit avoir lieu lors de la phase du permis de construire tandis que la seconde se fait à la fin des travaux de construction (Cabassud, 2020).

Le **Danemark** prône le recours à l'ACV. Cette dernière est nécessaire au système de certification allemand que le pays scandinave a adopté mais n'est toutefois pas obligatoire. Il en est de même pour l'utilisation des Déclarations environnementales de Produit (DEP), qui est vivement conseillée mais pas obligatoire sauf à Copenhague (Attia et al., 2021).

La **Finlande** ambitionne de devenir neutre en carbone d'ici à 2035. Pour ce faire, depuis 2020, une réglementation impose une évaluation de l'empreinte carbone des bâtiments et des seuils d'émissions à respecter. De plus, la Finlande a pour objectif de réduire de 80% ses émissions de GES par rapport à celles de 1990 d'ici à 2050 (Attia et al., 2021).

Aux **Pays-Bas**, tout permis environnemental doit obligatoirement être accompagné d'une déclaration néerlandaise de performance environnementale des bâtiments (Dutch Building Environmental Performance Declaration). Elle contient les impacts environnementaux de tous les matériaux de construction mis en œuvre dans le bâtiment. Ceux-ci sont issus d'ACV réalisées par des personnes qualifiées et sont regroupés dans la base nationale de données environnementales (Attia et al., 2021).

Depuis 2022, en **Suède**, afin d'avoir des émissions de GES nulles d'ici à 2045, des seuils précis d'émissions sont à respecter pour tous les nouveaux bâtiments. Par conséquent, la mise en place de l'ACV est obligatoire. De plus, ce pays prône le recyclage des déchets et ambitionne même d'en valoriser 70% (Attia et al., 2021).

2.1.5 Analyse du cycle de vie (ACV)

L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale qui est née dans les années 1970. Elle a pour objectif de calculer les impacts environnementaux des produits ou services durant l'ensemble de leur cycle de vie, « du berceau à la tombe » (from cradle to grave). À l'origine, cet outil scientifique a été développé afin d'étudier les produits de consommation (Plati & Tsakoumaki, 2023). Au cours du temps, cette méthode s'est normalisée au niveau international. La norme ISO 14040 définit l'ACV comme la « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits durant son cycle de vie » (ISO, 2020a).

Ce n'est que 20 ans plus tard, en 1990, qu'elle s'est étendue au secteur de la construction. La prise de conscience de l'impact de celui-ci sur le potentiel de réchauffement climatique depuis le début du 20^e siècle a permis à l'ACV de devenir l'outil incontournable pour déterminer les impacts environnementaux des bâtiments et des matériaux qui le composent (Khasreen et al., 2009). Dans ce secteur, l'ACV est un outil qui peut favoriser l'aide à la prise de décision. En effet, il permet notamment de comparer l'impact environnemental de différentes alternatives de conception afin d'opter pour les solutions les plus durables possibles (Di Maria et al., 2020).

À travers leurs recherches, différents auteurs insistent sur l'intérêt de combiner l'ACV avec le Coût du Cycle de Vie (CCV). La mise en parallèle de leurs résultats permet une analyse environnementale et économique pertinente (Hoogmartens et al., 2014). Selon Reddy, ces dernières sont généralement en conflit (Reddy et al., 2015). En effet, la conception de projets durables engendre des coûts supplémentaires liés aux produits utilisés, aux interventions qu'ils nécessitent et notamment à la mise en place de systèmes (Apostolopoulos et al., 2023).

2.1.5.1 Cadre réglementaire

Le Tableau 2.1 synthétise les normes et réglementations qui cadrent l'ACV. Elles ont différents domaines d'application et sont présentes à divers niveaux : international et européen. Elles sont détaillées ci-dessous.

Tableau 2.1 - Synthèse des normes de l'ACV

Niveau	Norme	Titre	Année	Domaine d'application
International	ISO 14040 : 2006/A1	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre	2020	Tous les secteurs
	ISO 14044 : 2006/A2	Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices	2020	
Européen	CEN 15978	Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul	2012	Secteur de la construction
	CEN 15804 : 2012+A2 : 2019/AC	Déclarations environnementales des produits de construction – Règles de base pour le développement de déclarations environnementales de produits de construction	2021	

- **Normes internationales**

Au niveau international, deux normes ont été rédigées par les Comités Techniques de l'Organisation Internationale de normalisation (ISO) : la norme ISO 14040 et la norme ISO 14044. Ces dernières permettent d'homogénéiser les méthodes d'ACV en décrivant le cadre, les principes, les exigences et les lignes directrices à suivre afin de réaliser une ACV conforme à la réglementation. L'ACV présentée et réglementée dans ces normes est applicable dans tous les secteurs (ISO, 2020a, 2020b).

Comme son nom l'indique, la norme ISO 14040 « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre » détaille les principes à considérer lors d'une ACV et décrit le cadre. Différents concepts y sont abordés tels que le domaine d'application, les termes et définitions, la description générale du cycle de vie comprenant ses principes, ses phases et ses caractéristiques, ainsi que le cadre méthodologique et en particulier les exigences, l'inventaire du cycle de vie, l'évaluation de l'impact du cycle de vie et l'interprétation du cycle de vie (ISO, 2020a).

Ensuite, la norme ISO 14044 « Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices », présente les exigences et les lignes directrices à suivre afin de réaliser une ACV. Sa structure est relativement semblable à celle de la norme précédente (ISO, 2020b).

- **Normes européennes**

Au niveau européen, il existe également deux normes dont le domaine d'application est le secteur de la construction : la norme CEN 15978 et la norme CEN 15804. Elles ont toutes deux été rédigées par le Comité Technique et adoptées par le CEN (CEN, 2012, 2021).

La norme CEN 15978 « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul » permet d'évaluer les performances environnementales des bâtiments, qu'ils soient neufs ou existants. Elle détaille les méthodes de calcul à suivre selon les étapes du cycle de vie (CEN, 2012).

Quant à la norme CEN 15804 « Déclarations environnementales des produits de construction – Règles de base pour le développement de déclarations environnementales de produits de construction », elle se concentre sur l'harmonisation de la structure des déclarations environnementales des produits (DEP). Ces dernières fournissent les données environnementales selon différents indicateurs propres à un produit de construction (CEN, 2021).

2.1.5.2 Les étapes de l'ACV

Selon les normes internationales ISO 14040 et ISO 14044, l'ACV doit se faire en quatre étapes (ISO, 2020a, 2020b). Ces dernières sont présentées dans la Figure 2.2 et décrites ci-dessous.

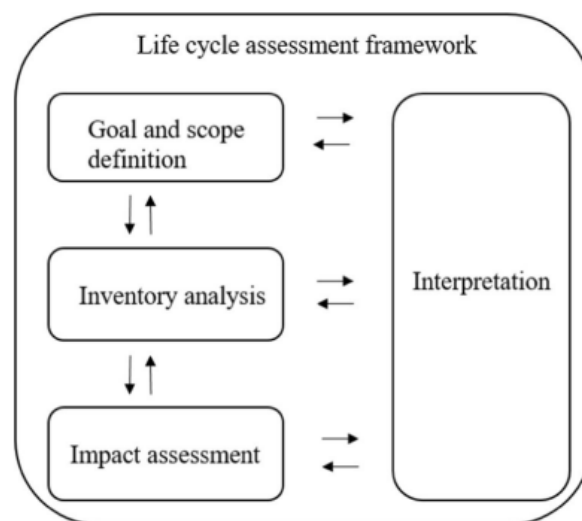


Figure 2.2 - Les étapes d'évaluation de l'ACV (Chen et al., 2023)

1. Définition et portée de l'objectif

Dès la première étape de l'ACV, il est nécessaire de fixer explicitement les objectifs de l'étude et son champ d'application. Leur définition permet de connaître le contexte dans lequel s'inscrit la recherche en détaillant notamment le public ciblé, les raisons pour lesquelles elle est réalisée, ses limites et hypothèses, la détermination de l'unité fonctionnelle et les exigences en termes de données utilisées (ISO, 2020a, 2020b).

2. Analyse de l'inventaire du cycle de vie

Durant cette étape, les données qui permettront de quantifier les intrants et les extrants sont collectées et vérifiées. Elles sont ensuite traitées afin d'évaluer les impacts environnementaux (ISO, 2020a, 2020b). D'après Anand et Amor, ces données peuvent provenir de différentes sources comme de DEP, des bases de données et plus particulièrement d'Ecoinvent, des rapports de chantiers ainsi que des devis (Anand & Amor, 2017). La disponibilité d'un grand nombre de sources de données, ajoutée aux différentes manières dont les données peuvent être récoltées, aboutissent à des résultats variables (Vasishta et al., 2023).

3. Évaluation des impacts du cycle de vie

Les émissions calculées durant l'étape précédente contribuent à différents impacts environnementaux. En accord avec les objectifs préalablement établis, cette troisième étape permet donc de les classer selon les 22 indicateurs environnementaux définis par la norme CEN 15804. Ces derniers sont répartis en 3 catégories (CEN, 2021) :

- Sept indicateurs décrivent les impacts environnementaux
- Huit indicateurs décrivent l'utilisation des ressources
- Sept indicateurs décrivent les catégories de déchets et les flux sortants

Ci-dessous, sont présentés uniquement les sept indicateurs environnementaux avec leur unité respective.

Tableau 2.2 - Indicateurs décrivant les impacts environnementaux (CEN, 2012)

Indicateur	Unité
Potentiel de réchauffement climatique (GWP)	kg éq. CO ₂
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)	kg éq. CFC 11
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau (AP)	kg éq. SO ₂ ⁻²
Potentiel d'eutrophisation (EP)	kg éq. (PO ₄) ⁻³
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique (POCP)	kg éq. éthylène
Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments (ADP_éléments)	kg éq. Sb
Potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles (ADP_combustibles fossiles)	MJ, valeur calorifique nette

La norme CEN 15978 décrit un calcul matriciel afin d'évaluer la contribution de chacun des 22 indicateurs (CEN, 2012). La littérature scientifique ne se concentre néanmoins généralement que sur un faible nombre d'impacts environnementaux. Le Potentiel de Réchauffement Global (PRG) en fait la plupart du temps partie.

L'évaluation de l'impact environnemental consiste en la multiplication de chaque produit d'une phase par la valeur relative de son indicateur environnemental (CEN, 2012). Le Guide RE2020 schématise le principe de calcul comme représenté par la Figure 2.3. Tout d'abord, le facteur d'adaptation varie en fonction des produits. Il permet, par exemple, de considérer le renouvellement d'un produit dont la DVR est inférieure à la

période d'étude. Ensuite, les quantités dépendent de la quantité de produit présente dans le bâtiment étudié. Leurs unités peuvent varier (m², m³, unités ...). Si ces dernières diffèrent de l'unité fonctionnelle du produit, le facteur d'adaptation permet d'ajuster la quantité à l'unité fonctionnelle. Enfin, les données environnementales proviennent des FDES ou DEP issues de bases de données (Cabassud, 2020).



Figure 2.3 - Principe de calcul des impacts environnementaux (Cabassud, 2020)

4. Interprétation

Durant cette étape, les résultats sont analysés et interprétés afin d'évaluer les possibilités de réduction de la consommation et des émissions à chaque étape du cycle de vie (CEN, 2012).

2.1.5.3 Les phases de l'ACV

La Figure 2.4 détaille les différentes phases de l'ACV telles que décrites dans la norme CEN15978. Cette dernière présente une ACV complète du bâtiment depuis l'acquisition de la matière première jusqu'à l'élimination et au recyclage.

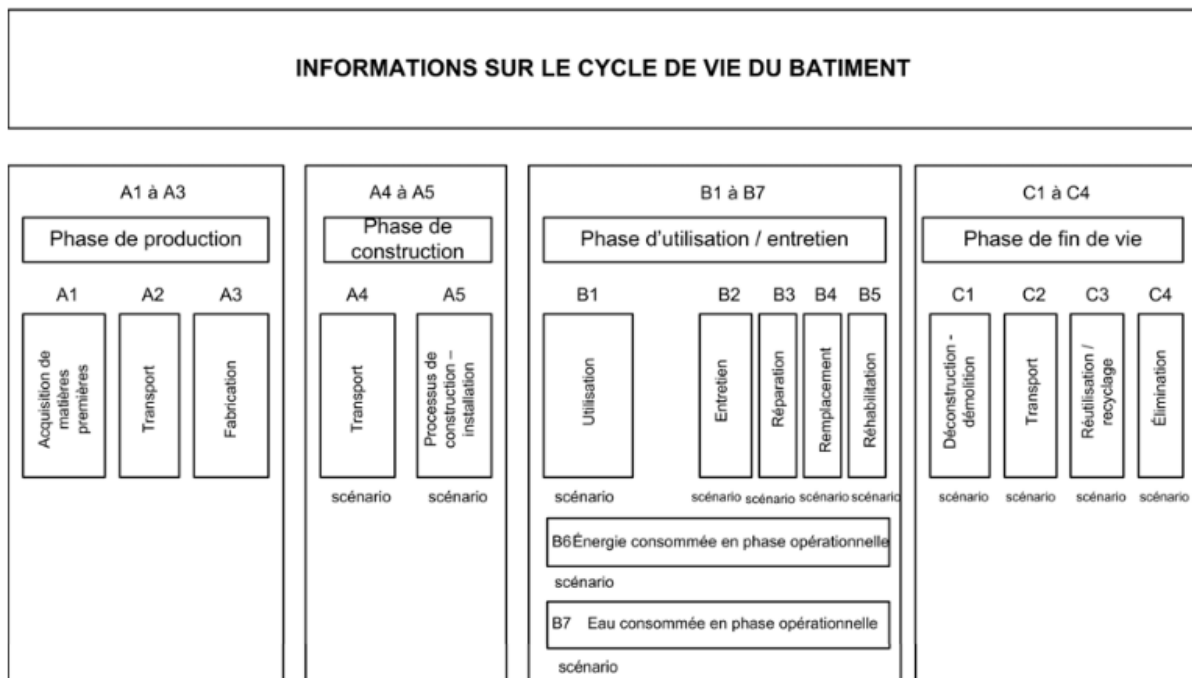


Figure 2.4 - Les différentes phases de l'ACV d'un bâtiment (CEN, 2012)

La phase de production (A1-A3) considère seulement une partie de l'impact du produit ou du bâtiment étudié, c'est-à-dire uniquement les émissions liées à l'extraction, au transport et à la fabrication des matières premières. Ensuite, la phase de construction (A4-A5) considère les émissions engendrées par le transport des matériaux depuis l'usine jusqu'au chantier, ainsi que celles provenant de la construction du bâtiment sur le chantier. La troisième phase est la phase d'utilisation (B1-B7). Elle envisage les émissions liées au remplacement, à la réparation et à l'entretien des matériaux ainsi que celles engendrées par la production d'énergie opérationnelle pour le chauffage, l'eau chaude et l'électricité par exemple. Enfin, la phase de fin de vie (C1-C4) prend en compte les émissions en provenance de la démolition du bâtiment et du recyclage des matériaux, y compris les déplacements qu'ils nécessitent (CEN, 2012).

Selon Attia, il existe trois modèles d'ACV (Attia, 2018) :

1. Le modèle « cradle to gate » ou « du berceau à la porte » correspond à la phase de production (A1-A3) comme décrite précédemment.
2. Le modèle « cradle to grave » ou « du berceau à la tombe » prend en compte la durée de vie complète du produit ou du bâtiment étudié, c'est-à-dire les phases de production (A1-A3), de construction (A4-A5), d'utilisation (B1-B7) et de fin de vie (C1-C4).
3. Le modèle « cradle to cradle » ou « du berceau au berceau » est un concept circulaire qui favorise la réutilisation des matériaux.

2.1.5.4 L'ACV en phase de « Concept Design »

La Figure 2.5 représente le paradoxe qui existe entre la capacité d'influencer les émissions du cycle de vie et la disponibilité des informations sur les émissions du cycle de vie de la phase de préconception à la phase d'utilisation d'un bâtiment (Bruce-Hyrkäs et al., 2018).

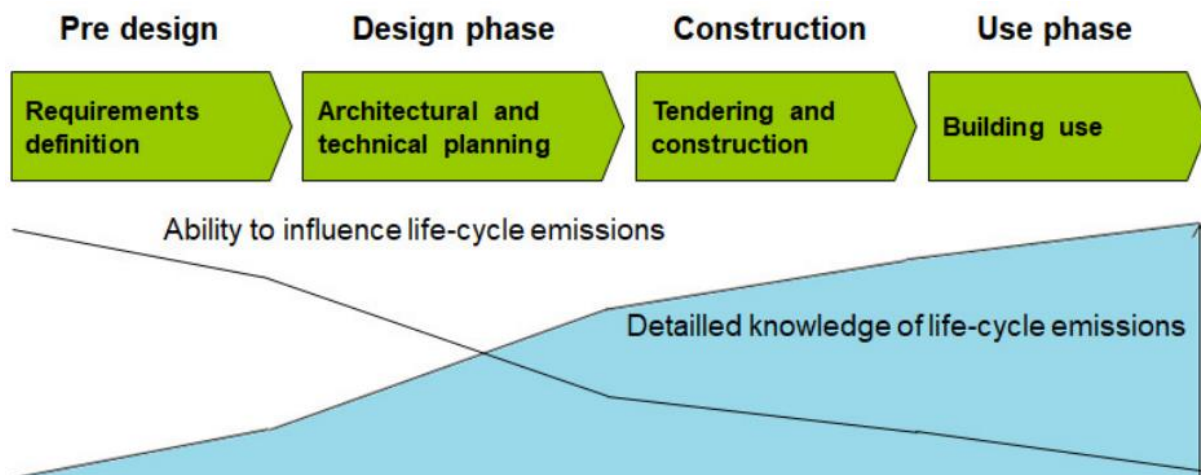


Figure 2.5 - Capacité d'influencer les émissions aux différentes étapes du processus de conception (Bruce-Hyrkäs et al., 2018)

D'une part, plus le projet se concrétise et plus il évolue dans le temps, moins le concepteur est capable d'influencer les émissions de GES que le bâtiment va produire. Réaliser une ACV tôt dans le processus de conception permet donc d'avoir une influence maximale sur l'impact environnemental du projet.

D'autre part, comme expliqué précédemment, l'ACV nécessite une série de données comme les quantités et les types de matériaux utilisés. Ces informations liées au projet sont de plus en plus détaillées au fil du temps. Par conséquent, réaliser une ACV tard dans le processus permet de la rendre plus précise.

Néanmoins, de nombreuses études telles que celle de Zimmermann et al. démontrent que les décisions prises en phase de conception ont une influence non négligeable sur le cycle de vie d'un bâtiment (Zimmermann et al., 2019).

Par conséquent, dans cette recherche, la phase considérée est la phase « Concept Design ». Le Royal Institute of British Architects (RIBA) définit huit étapes qui organisent le processus d'information, de conception, de construction et d'exploitation des projets (RIBA, 2020). « Concept Design » correspond à l'étape où le client approuve le concept architectural.



Figure 2.6 - Aperçu des huit étapes du RIBA Plan of Work (RIBA, 2020)

2.1.5.5 Les outils d'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Différents logiciels permettant d'évaluer les impacts environnementaux des bâtiments sont disponibles. Dans le cadre de cette étude, trois outils sont utilisés afin de réaliser l'ACV. Ils sont présentés ci-dessous.

TOTEM

Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials ou TOTEM est un outil scientifique belge d'évaluation des impacts environnementaux des bâtiments. Cet outil gratuit a été élaboré en 2018 sous l'initiative de l'OVAM (Organisme public pour la gestion des déchets en Région flamande), du SPW et de Bruxelles-Environnement, afin d'encourager la conception de bâtiments à faibles impacts environnementaux (Trigaux & Lam, 2023).

Développé en cohérence avec les normes européennes sur la PEB, il permet aux acteurs du secteur de la construction d'évaluer les performances environnementales des bâtiments. Il met également à leur disposition une bibliothèque qui contient les

données environnementales d'une série de matériaux en cohérence avec les spécificités du secteur belge (Trigaux & Lam, 2023).

TOTEM est accessible gratuitement en ligne et permet l'import de données du bâtiment à étudier à partir de différents types de fichiers comme IFC et Excel. Toutefois, il impose une durée de vie (DVR) du bâtiment de 60 ans qui n'est pas modifiable par l'utilisateur (Trigaux & Lam, 2023).

Dans sa bibliothèque, cet outil dispose de deux types de données (Trigaux & Lam, 2023) :

- Les données génériques issues de la base de données suisse Ecoinvent 3.6. Représentatives de l'Europe occidentale, elles sont harmonisées au contexte belge. Il faut toutefois être conscient qu'actuellement, Ecoinvent dispose d'une version 3.10 et que ces données datent donc de 2019. TOTEM compte 1251 données génériques.
- Les matériaux basés sur les DEP. Ces dernières proviennent de matériaux de construction commercialisés ou produits en Belgique. Les fabricants doivent disposer de données environnementales déclarées sous la forme B-EPD afin de faire apparaître leur produit dans la base de données belge. B-EPD est la base de données fédérale belge du service public fédéral. TOTEM dispose de ces données environnementales depuis 2020. TOTEM compte 77 DEP. (TOTEM, s. d.)

En termes de cycle de vie, TOTEM ne tient pas compte de toutes les étapes décrites dans le standard européen CEN 15978. En effet, la Figure ci-dessous représente en vert les modules qui sont considérés dans cet outil. Par conséquent, les phases B1, B3, B5, B7 et D sont négligées (Trigaux & Lam, 2023).

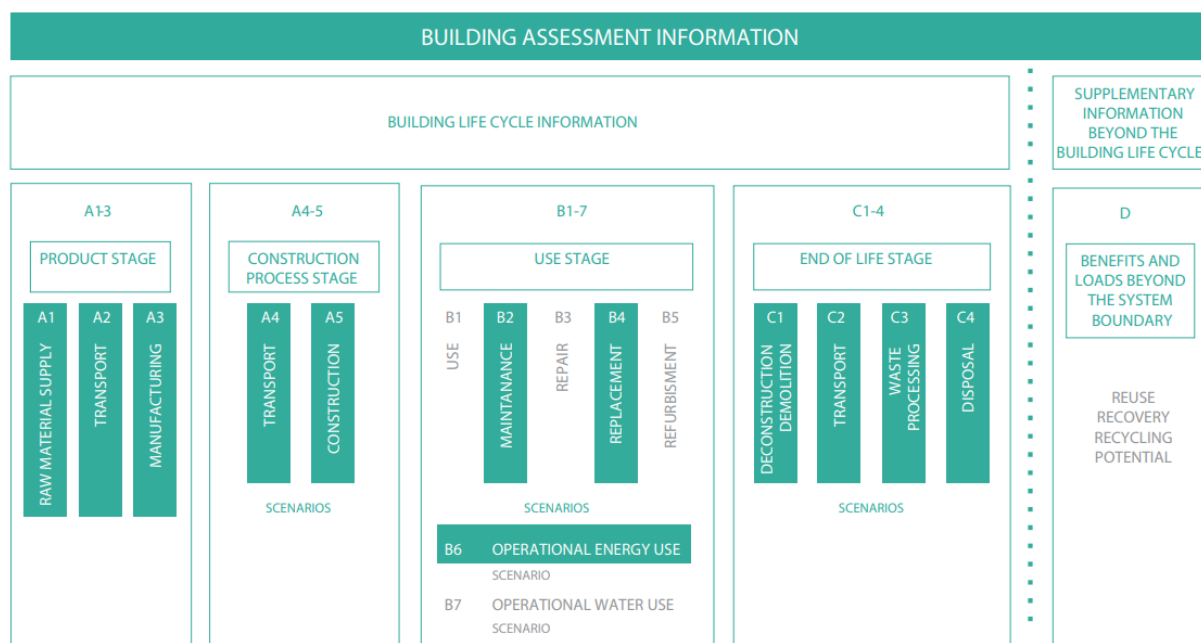


Figure 2.7 - Aperçu des étapes du cycle de vie provenant des standards européens (CEN, 2012). TOTEM considère les modules colorés en vert. (Trigaux & Lam, 2023)

TOTEM étudie 19 indicateurs environnementaux répartis en 12 catégories (Trigaux & Lam, 2023) :

- Changement climatique
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- Acidification
- Eutrophisation
- Création d'ozone photochimique
- Épuisement de l'eau
- Épuisement des ressources abiotiques
- Émissions de particules fines
- Écotoxicité
- Rayonnement ionisant
- Toxicité humaine
- Utilisation et qualité du sol

Enfin, à l'origine, dans TOTEM, les impacts environnementaux étaient réduits à un score unique appelé « Coût environnemental » grâce à la méthode MMG (Milieugerelateerde Materiaalimpact van Gebouw elementen ou impact matériel des éléments de construction sur l'environnement). Cette dernière fixe des indicateurs monétaires pour chaque impact environnemental étudiés dans TOTEM afin d'évaluer le coût environnemental que représente le dommage engendré par le bâtiment. Cette méthodologie a été mise à jour afin de s'aligner sur les standards européens et sur les développements de l'empreinte environnementale des produits européens (PEF ou European Product Environmental Footprint). Cette méthode, exprimée en Milli-points, est réalisée en deux étapes et permet également d'obtenir un score unique (Trigaux & Lam, 2023).

La première étape est la normalisation. Elle consiste en la division de l'impact environnemental par un facteur de normalisation. Ce dernier représente l'impact global annuel par habitant. La seconde est la pondération. Elle consiste en la multiplication du résultat pondéré par un facteur de poids respectif. Ce dernier diffère en fonction de l'indicateur environnemental étudié afin de représenter son importance dans le résultat final (Trigaux & Lam, 2023).

One Click LCA

One Click LCA est un logiciel développé par la société BioNova Ltd conformément aux normes ISO 14040, ISO 14044 et CEN 15978. Il est généralement utilisé par des professionnels du secteur de la construction (Dsilva et al., 2023) afin d'évaluer l'empreinte carbone d'un bâtiment sur tout son cycle de vie (du berceau à la tombe). Il est accessible en ligne mais nécessite une licence payante donnant accès à des fonctionnalités supplémentaires. Dans le cadre de cette étude, la licence étudiante mise à ma disposition est relativement limitée en termes de fonctionnalité et d'assistance. En effet, seuls les utilisateurs qui possèdent une licence payante ont droit à un support client (One Click LCA, s. d.).

Ce logiciel contient une base de données importante. En effet, il permet d'accéder à celles issues de différentes bases de données internationales telles que Ecoinvent ou INIES. Les DEP et FDES contenues dans celles-ci sont directement consultables à partir de l'outil One Click LCA qui en compte plus de 200 000. Ce logiciel ambitionne de donner accès à la plus grande base de données de construction au

monde à ses utilisateurs. Par conséquent, ils localisent, vérifient et actualisent régulièrement leurs données (One Click LCA, s. d.).

One Click LCA prend en charge plus de 70 certifications, normes et exigences comme RE2020 et Level(s). Il permet également l'intégration de données depuis un grand nombre d'outils de conception tels que Excel, BIM et bien d'autres encore (One Click LCA, s. d.).

Enfin, One Click LCA prend en compte dans ses calculs toutes les étapes du cycle de vie telles que définies dans la norme CEN 15978 (One Click LCA, s. d.).

2.1.5.6 Gaz à Effet de Serre (GES)

Les gaz à effet de serre (GES) sont au nombre de sept : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O) et quatre gaz fluorés. Ils proviennent des activités humaines comme la combustion d'énergie fossile, l'industrialisation, l'agriculture, l'élevage, etc. (Commissariat général au développement durable, 2019).

Présents dans l'atmosphère, ils sont les principaux contributeurs au phénomène d'effet de serre. Par celui-ci, la terre capte les rayonnements thermiques et rend la vie possible. Néanmoins, l'augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère accroît la température moyenne mondiale et engendre d'autres conséquences sur le climat telles que la sécheresse, la fonte des glaciers, etc. (Commissariat général au développement durable, 2019).

Le phénomène d'effet de serre s'exprime en tonnes de CO₂ équivalent (tCO₂eq). Cette unité est une unité commune créée par le GIEC, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat, afin de pouvoir comparer les différents GES. Ces derniers diffèrent par la quantité de rayonnement qu'ils possèdent ainsi que par la durée pendant laquelle ils restent dans l'atmosphère (Corradi, 2022). Convertir les GES en dioxyde de carbone équivalent permet de comparer leur propre contribution sur l'effet de serre. Quant à l'empreinte carbone, elle permet d'évaluer l'impact d'une activité ou d'un bâtiment sur l'environnement. Elle dépend des émissions de CO₂eq qui y sont liées.

2.1.5.7 Carbone incorporé et opérationnel

Un bâtiment consomme durant son cycle de vie deux types d'énergie : l'énergie grise et l'énergie opérationnelle (Zhang & Wang, 2017). La Figure suivante présente la relation entre les étapes de l'ACV et les émissions de carbone générées.

L'énergie grise est l'énergie consommée pour la production, la construction, le transport, la rénovation ainsi que parfois la fin de vie du bâtiment. Elle est responsable des émissions de carbone incorporé, appelées émissions intrinsèques (Lara Allende & Stephan, 2022).

Quant à l'énergie opérationnelle, elle englobe l'énergie liée aux combustibles fossiles nécessaire à la production de chauffage, d'éclairage et de climatisation notamment, c'est-à-dire à l'exploitation du bâtiment. Ce type d'énergie est responsable des émissions de carbone opérationnel (Lara Allende & Stephan, 2022).

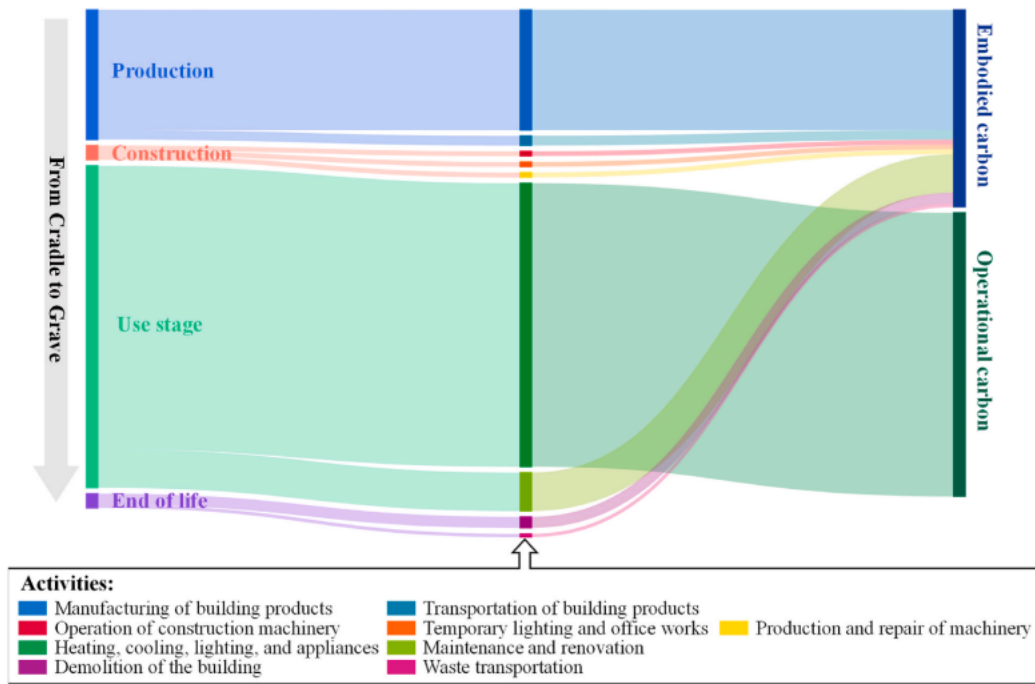


Figure 2.8 - Relation entre les étapes du cycle de vie du bâtiment et les deux composants carbone (Liang et al., 2023)

2.2 Concepts et variables de la recherche

2.2.1 Déclaration environnementale du produit (DEP)

La norme CEN 15804 se concentre sur l'harmonisation de la structure des déclarations environnementales des produits (DEP). Celles-ci fournissent les données environnementales relatives à un produit de construction selon différents indicateurs. Divers éléments doivent obligatoirement y figurer comme les informations concernant le fabricant, l'unité fonctionnelle (UF) du produit ainsi qu'une description de son utilisation, la date de validité de la DEP, les étapes couvertes par cette dernière, etc. Réalisées par les fabricants sur base d'une ACV, les DEP sont vérifiées selon la norme ISO 14025 (CEN, 2021).

En Belgique, le Service Public Fédéral Santé a mis en place une base de données qui regroupe l'ensemble des DEP présentes sur le marché belge conformes à la norme CEN 15804. Cette base de données créée en décembre 2016 est nommée Belgium Environmental Declaration Product (B-EPD) (Guide Bâtiment Durable, 2020).

2.2.2 Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES)

En France, les DEP sont appelées Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). Au même titre que les DEP, les FDES sont cadrées par la norme 15804 et contiennent les résultats de l'ACV propre à un produit. De plus, elles contiennent également des données sanitaires (INIES, s. d.).

Il existe différents types de FDES (INIES, s. d.) :

- Les FDES collectives : elles comprennent les impacts environnementaux et sanitaires d'un même type de produit fabriqué par différents fabricants.
- Les FDES individuelles : elles comprennent les impacts environnementaux et sanitaires relatifs à un produit spécifique.
- Les FDES par défaut : elles permettent de réaliser une ACV la plus complète possible sans avoir connaissance du produit spécifique utilisé ou en l'absence d'une FDES collective ou individuelle. Elles sont réalisées par le ministère chargé de la construction

Enfin, les FDES considèrent la totalité du cycle de vie. Par conséquent, le modèle d'ACV des produits est le « cradle to grave » (INIES, s. d.).

2.2.3 Unité fonctionnelle (UF)

Selon la norme ISO 14044, l'unité fonctionnelle (UF) est définie comme étant une « performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie » (ISO, 2020b).

Chaque produit qui dispose d'une DEP doit contenir une UF par laquelle sont déclarés les impacts environnementaux. Elle doit obligatoirement mentionner l'application, la durée de vie de référence, les performances et décrire le produit couvert par la DEP (INIES, s. d.).

2.2.4 Durée de vie de référence (DVR)

La norme CEN 15804 définit la durée de vie de référence (DVR) comme étant la « durée de vie qui peut être attendue pour un produit de construction selon un ensemble particulier (ensemble de références) de conditions d'utilisation et qui peut servir de base pour l'estimation de la durée de vie dans d'autres conditions d'utilisation » (CEN, 2021). Elle s'exprime en années et est obligatoirement contenue dans les DEP de tous les produits.

Lors de l'ACV d'un bâtiment, la RE2020 impose une DVR égale à 50 ans. Dans ce cas, cette dernière est appelée période d'étude (Cabassud, 2020). Par conséquent, les produits qui disposent d'une DVR inférieure à la période d'étude doivent être remplacés autant de fois que nécessaire (INIES, s. d.).

2.2.5 Potentiel de réchauffement global (PRG)

Le potentiel de réchauffement global (PRG) fait partie des 22 indicateurs environnementaux définis par la norme CEN 15804. Dans le cadre de cette recherche, il représente le seul indicateur étudié. Il s'exprime en kilos de dioxyde de carbone équivalent (kgCO₂eq) et permet d'évaluer la contribution des GES sur le réchauffement climatique durant une période de vie de 100 ans.

Cette unité est une unité commune créée par le GIEC, afin de pouvoir comparer les différents GES. Ces derniers diffèrent par la quantité de rayonnement qu'ils possèdent ainsi que par la durée pendant laquelle ils restent dans l'atmosphère (Corradi, 2022).

2.2.6 Surface brute de plancher

Telle que définie dans la réglementation PEB, la Surface de Plancher Utile (SPU) correspond à la somme des surfaces de planchers chauffés du bâtiment, mesurées au nu extérieur des murs des façades (Guide Bâtiment Durable, 2020).

2.3 Études similaires et gap scientifique

Différentes études se rapprochent du sujet de cette recherche, à savoir la comparaison de l'ACV et du coût de l'enveloppe d'un cas d'étude selon cinq systèmes constructifs différents. Le Tableau 2.3 synthétise les études similaires qui sont décrites ci-dessous.

Tout d'abord, **Balasbaneh & Bin Marsono** (2017) ont réalisé une étude qui compare l'impact environnemental de six techniques différentes de système de construction à partir d'une ACV. Dans cette recherche, seul le PRG est étudié sur une durée de vie de référence du bâtiment estimée à 50 ans. L'outil utilisé afin de réaliser l'ACV est l'outil Simapro.8 et les bases de données de référence sont Ecoinvent ainsi qu'une base de données malaisienne.

L'ACV est réalisée du berceau jusqu'à la tombe. Par conséquent, les étapes de transport, d'extraction de la matière première, de production des matériaux, les activités de construction, de réparation, de rénovation et de démolition sont prises en compte. Ils ont toutefois décidé de négliger l'énergie consommée pour l'éclairage, les appareils électriques et l'eau sanitaire. Ils ont également fait l'hypothèse que le revêtement de sol est identique quel que soit le système de construction. Celui-ci n'a donc pas été étudié.

Le cas d'étude de cette recherche est une maison unifamiliale malaisienne située à Kuala Lumpur. Six scénarios de construction ont été établis et analysés. Les quatre premiers représentent des systèmes constructifs couramment utilisés, les deux suivants correspondent à des alternatives en bois. Ces deux derniers ont pour objectif de pallier les points négatifs de la structure bois qui présente régulièrement des fissures et des portances limitées.

1. En blocs de béton
2. En béton préfabriqué
3. En ossature métallique
4. En bois (système poteau poutre)
5. En bois lamellé collé
6. En placage bois laminé

Les résultats ont montré que le système constructif le plus émissif est le premier, en blocs de béton, suivi par le système à ossature métallique et par la construction en béton préfabriqué. Les alternatives qui sont les moins émissives sont celles réalisées en bois. Les résultats du système constructif en bois lamellé collé et en placage bois laminé sont presque similaires. L'ossature en bois de type poteau-poutre est tout de même l'alternative qui émet le moins de dioxyde de carbone. Néanmoins, les auteurs soulignent le caractère porteur des deux autres variantes en bois qui sont à considérer.

Ensuite, à travers leur recherche, **Motuzienè et al.** (2016) ont pour objectif d'obtenir la meilleure alternative d'un cas d'étude en termes de demande énergétique primaire, de PRG, d'appauvrissement de la couche d'ozone et de CCV. Les

éléments étudiés sont l'enveloppe de manière générale et les différents systèmes (de chauffage, d'égout, de plomberie, de ventilation et électrique). Le cas d'étude est une maison familiale lituanienne de forme carrée et dont le toit est plat. Sa durée de vie est estimée à 100 ans. Les alternatives étudiées sont les suivantes : en maçonnerie, en rondins et en ossature bois.

Leur étude est réalisée en quatre étapes. La première consiste en la modélisation du cas d'étude et des équipements qu'il contient sur l'outil Design Builder. Dans ce dernier, les alternatives de l'enveloppe sont créées et les équipements qu'il comprend, c'est-à-dire le chauffage, l'éclairage, l'eau sanitaire et la ventilation, sont paramétrés. L'utilisation de cet outil permet d'obtenir la demande énergétique opérationnelle du bâtiment ainsi que la quantité de matériaux utilisés.

La deuxième étape permet d'évaluer les impacts environnementaux de l'enveloppe des alternatives. L'ACV est réalisée à partir de l'outil SimaPro 7.2. Les phases du cycle de vie incluses dans cette étude sont l'extraction de la matière première, la production des matériaux, la construction, l'exploitation, la maintenance ainsi que la démolition et le recyclage. Le bénéfice du recyclage est toutefois négligé. Trois catégories d'impacts sont étudiées : la demande d'énergie primaire, le PRG et l'appauvrissement de la couche d'ozone.

La troisième étape concerne l'analyse du CCV. Ce dernier prend en considération l'investissement initial, les frais de remplacement ainsi que les coûts d'exploitation, de maintenance, de réparation et d'énergie.

La quatrième et dernière étape consiste en la mise en place d'un processus de prise de décision à l'aide de la méthode multicritères COPRAS (COMplex PROportional ASsessment). Les alternatives sont évaluées et classées selon les indicateurs du cycle de vie étudié et les résultats du CCV. Pour l'analyse multicritères, 30 scientifiques ont participé à une enquête afin de fixer la pondération et de déterminer la priorité des différents critères étudiés. Ce travail a abouti à un classement des critères. Le CCV est celui qui a le plus d'importance. Il est suivi par la demande d'énergie primaire et par le PRG. Celui qui est considéré comme le plus négligeable est l'appauvrissement de la couche d'ozone.

Les résultats ont toutefois été analysés une première fois avant la mise en place de la pondération des critères. Le bâtiment en rondin est apparu comme le plus attractif, hormis d'un point de vue de CCV. À l'inverse, le bâtiment en maçonnerie présente le coût le moins élevé mais ses émissions et sa consommation d'énergie sont les plus conséquentes.

Malgré la mise en place de la pondération des critères qui désigne le CCV comme le critère le plus important, la construction en rondin s'avère tout de même la meilleure. Les différences de coûts entre les trois alternatives ne sont pas suffisamment significatives pour influencer les résultats. La construction en ossature bois vient en seconde position et celle en maçonnerie en dernière position.

L'étude de **Sandanayake et al.** (2018) vise à comparer les émissions de GES liées à l'étape de construction d'un bâtiment en bois et d'un bâtiment en béton. Par conséquent, deux cas d'étude figurent dans cette recherche. Le premier concerne un bâtiment commercial de 15 étages à Melbourne tandis que le second se rapporte à un bâtiment à destination résidentielle et commerciale à Londres. Ce dernier est construit en bois hormis le sous-sol, le rez-de-chaussée et les fondations qui sont réalisées en béton armé.

La volonté des auteurs est de comparer les émissions de GES en phase de construction. Par conséquent, L'ACV est réalisée du berceau à la porte, c'est-à-dire qu'elle considère uniquement l'extraction de la matière première, son transport jusqu'à l'usine et la fabrication des matériaux de construction. Seule une partie du cycle de vie est considérée.

Les résultats sont donnés en kilos de dioxyde de carbone équivalent en mètre carré afin de comparer ces deux cas d'étude. Il en ressort que le bâtiment en bois a des émissions inférieures à celui réalisé en béton. Ils ont toutefois décidé de ne pas s'arrêter là. Deux scénarios ont été envisagés afin de varier la distance de transport et la composition des matériaux par l'utilisation de matériaux recyclés afin de connaître leur influence sur les résultats.

La recherche d'**Azzouz et al.** (2017) tente de comparer les résultats issus de l'ACV d'un cas d'étude selon une série de scénarios établis. Les auteurs ont décidé d'utiliser l'outil d'ACV IMPACT et d'étudier les indicateurs suivants : l'épuisement des énergies fossiles, la demande d'énergie primaire et le PRG. Le cas d'étude concerne un immeuble de taille moyenne au Royaume-Uni qui est au stade de conception. Ce dernier est réalisé à partir de matériaux traditionnels. Seuls l'enveloppe et les systèmes du bâtiment sont considérés, pour une durée de vie de référence estimée à 60 ans.

Différents scénarios ont été établis. Le premier concerne le cas de base et correspond à la conception initiale du bâtiment. La dalle est réalisée en béton coulé sur place pour sa simplicité de construction, ses capacités de stockage, d'inertie thermique et son faible entretien. Néanmoins, son poids est élevé et nécessite généralement des fondations, des colonnes et des poutres plus grandes.

Diverses alternatives ont été créées en changeant la superstructure et la sous-structure du cas de base. Tout d'abord, la dalle en béton peut être réalisée en béton précontraint afin de diminuer le volume de celle-ci. Ensuite, le béton peut être remplacé par une structure mixte en CLT et en ossature en acier. Enfin, la mise en place de planchers composites et d'éléments structuraux en acier permet de faciliter le montage, de diminuer le volume par rapport au béton et d'assurer une meilleure flexibilité.

Le second scénario utilise des matériaux durables dont la teneur en carbone est faible. Il privilégie les matériaux recyclés en remplaçant tout d'abord le béton à base de ciment de portland ordinaire par un mélange constitué de 30% de cendres volantes. Ce changement ralentit la prise mais la résistance à long terme reste identique. Ensuite, les briques sont remplacées par des briques de récupération. Enfin, l'isolation est réalisée par des panneaux en liège.

D'autres scénarios accompagnés de différentes alternatives concernant la mise en place de systèmes durables comme des panneaux photovoltaïques, la production combinée de chaleur et d'électricité, la ventilation naturelle, etc. sont également cités dans cette recherche.

Les résultats montrent que le scénario deux, qui nécessite l'utilisation de matériaux durables, permet la plus grande économie de carbone. De plus, ils mettent en évidence que réaliser une ACV au stade précoce a un impact significatif. Dans ce cas d'étude, cela a permis de diminuer de 13,4% l'énergie du cycle de vie et de 16,3% le carbone de ce dernier.

En ce qui concerne **Flager et al.** (2012), l'objectif de leur étude est d'évaluer le CCV et l'empreinte carbone pour une série d'alternatives de conception de bâtiment, afin de permettre aux parties prenantes du projet d'identifier les compromis entre la problématique environnementale et économique. Cette analyse inclut l'enveloppe du bâtiment ainsi que l'ensemble de son système mécanique. L'outil DProfiler est utilisé pour calculer les coûts d'investissement et d'exploitation, tandis que SimaPro 2010 est employé pour évaluer l'empreinte carbone. Quant à la simulation énergétique, elle est réalisée via l'outil eQuest.

Du point de vue environnemental, dans cette étude, seul le PRG est étudié. L'ACV prend en compte différentes phases du cycle de vie : l'extraction de la matière première, la production de matériaux de construction, la construction, l'entretien, la réparation, le remplacement et l'exploitation. La démolition est toutefois négligée. La durée de vie estimée du bâtiment est de 30 ans.

Le cas d'étude concerne un immeuble de bureaux de sept étages à Atlanta dans l'état de Géorgie (USA). Ce projet fait partie d'un plan directeur dans lequel se trouvent trois bâtiments de même taille, de même forme et de mêmes matériaux. Lors de cette étude, un bâtiment était déjà en service, le second arrivait en fin de phase de construction, tandis que le dernier était en phase de conception. Cette étude est donc une façon de déterminer de quelle manière réduire le coût de l'impact environnemental des futurs bâtiments du plan directeur. L'objectif est de minimiser le CCV et l'empreinte carbone des bâtiments.

Six variables de conception ont été manipulées durant cette recherche afin de répondre au mieux aux objectifs. Parmi elles se trouvent l'orientation du bâtiment, les relations avec les bâtiments voisins, le pourcentage de vitrage et le type de vitrage. La diversification de ces variables a permis une diminution du CCV de 5,1% mais une augmentation de l'empreinte carbone de 1,6%. À l'inverse, elle a également permis d'obtenir une solution qui contribue moins au PRG avec une diminution des émissions de carbone de 7,1% et du coût de 3,8%.

Dans sa recherche, **Guardigli** (2014) a pour objectif de comparer deux technologies différentes de construction via l'ACV. L'analyse se fait grâce au logiciel openSource OpenLCA pour la phase d'inventaire du cycle de vie. Quant à la phase d'évaluation, elle est réalisée sur Eco-indicateur 99. Ce dernier est conforme au contexte européen et agrège les résultats afin de les rendre plus compréhensibles. Ils sont appelés éco-indicateurs et ils prennent en considération trois catégories de dommages basés sur différents indicateurs. Les catégories sont les suivantes : la santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources. Diverses bases de données ont été testées pour cette étude : tout d'abord la base de données suisse Ecoinvent, ensuite une base de données américaine et enfin celle du centre commun de recherche de la Communauté européenne.

L'étude porte sur un cas de base qui correspond à un bâtiment résidentiel écologique destiné à être adaptable à différentes régions du sud de l'Europe. Ce dernier est analysé selon deux systèmes constructifs différents : le bois et le béton qui est considéré comme la solution standard. Les éléments considérés sont les fondations, les structures, les sols sans finition et les cloisons sans finition intérieure.

La conclusion de cette étude est que le bâtiment en bois affecte plus l'écosystème que celui en béton. Toutefois, son impact sur les ressources et la santé humaine est

moindre que celui du bâtiment en béton. Le bâtiment en bois présente un bilan énergétique global favorable.

À travers leur étude, **Nässén et al.** (2012) veulent évaluer les coûts et le bilan carbone de bâtiments spécifiques dont les compositions de matériaux varient. Ils ont toutefois pris le parti de négliger la consommation d'énergie, les coûts liés à la construction du bâtiment ainsi que la phase d'utilisation.

Leur étude analyse trois scénarios énergétiques et deux années de construction différentes sur une durée de vie de 100 ans.

Ainsi, trois scénarios de système d'approvisionnement en énergie ont été générés :

1. Scénario de référence, sans contrainte climatique
2. Concentration atmosphérique de dioxyde de carbone fixe et stable mais dominée par les sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne
3. Concentration atmosphérique de dioxyde de carbone fixe et stable qui inclut le captage du carbone et son stockage

Les années de construction étudiées sont les suivantes :

1. 2010 avec l'utilisation d'un mix énergétique actuel
2. 2050 avec l'utilisation d'un système énergétique à faible émission de carbone

La quantité de matériaux utilisés est estimée à partir de deux bâtiments équivalents de quatre étages en Suède. Ceux-ci ont déjà été analysés dans des études précédentes. Par conséquent, leurs résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus dans le passé.

Enfin, il apparaît que les émissions en dioxyde de carbone du béton sont plus de deux fois plus importantes que celles du bâtiment en bois construit en 2010. En 2050, quel que soit le système constructif, les émissions nettes sont négatives. En ce qui concerne les coûts de dioxyde de carbone, ils sont plus élevés en 2050 qu'en 2010 pour les deux bâtiments. Ceci s'explique par la hausse du coût du carbone.

L'étude d'**Alshamrani** (2016) évalue l'impact environnemental de huit combinaisons de structure de l'enveloppe d'un cas d'étude. Ce dernier est un immeuble de bureaux de deux étages à New-York. Sa durée de vie est estimée à 60 ans. Différents éléments sont considérés tels que les semelles, les dalles de sol, les colonnes, les poutres, les planchers, les toits, les murs intérieurs et extérieurs et les fenêtres. Les différentes configurations testées sont réalisées soit en béton, soit en acier et disposent de particularités décrites dans la recherche.

Tout d'abord, une simulation énergétique horaire permet de calculer les consommations annuelles en électricité et en gaz naturel. Celle-ci est réalisée sur l'outil eQUEST, couramment utilisé en Amérique du Nord.

Ensuite, l'ACV est réalisée à partir du logiciel canadien ETHNA 2011. Elle prend en compte la totalité du cycle de vie, c'est-à-dire : la phase de fabrication, de construction, l'utilisation et la fin de vie. Les indicateurs étudiés sont la consommation d'énergie, le PRG ainsi que les émissions dans l'eau, le sol et l'air.

Les résultats permettent d'observer que les consommations d'énergie du bâtiment en béton préfabriqué sont les plus faibles tandis que celles du bâtiment en ossature métallique sont les plus élevées en raison d'une consommation importante en phase de fabrication.

Au niveau de la phase de construction, la consommation énergétique est très semblable pour l'ensemble des cas étudiés. Seul le béton préfabriqué, en raison des interventions minimales qu'il nécessite sur chantier, engendre des consommations d'énergie bien plus faibles.

En ce qui concerne le PRG, les émissions de CO₂eq sont les plus importantes en phase d'exploitation. En effet, la consommation d'énergie entraîne des émissions conséquentes.

Au niveau du coût, le bâtiment en béton préfabriqué présente le coût le plus faible alors que les bâtiments dotés de murs rideaux ont le coût le plus élevé.

Enfin, pour conclure, sur une durée de vie totale du bâtiment, les bâtiments en béton préfabriqué offrent les meilleures performances en termes de consommation d'énergie, de potentiel de réchauffement de la planète et d'émissions dans l'eau, l'air et le sol.

Enfin, le travail de fin d'étude de **Bodmer** (2020), intitulé : "Analyse du cycle de vie et coût du cycle de vie dans la rénovation des logements en Belgique : Analyse comparative de différents matériaux et techniques" tente de répondre à diverses questions de recherche :

- « Quels sont les matériaux et techniques de rénovation à l'impact environnemental le plus réduit ? »
- « Quels sont les matériaux et techniques de rénovation au coût le plus réduit ? »
- « Quels sont les matériaux et techniques de rénovation à l'impact le plus réduit possible pour le coût le plus réduit possible ? »

Tout d'abord, son travail se concentre sur un cas d'étude dont les performances énergétiques sont médiocres. Il s'agit d'une maison à quatre façades située en Belgique. Seule l'enveloppe du bâtiment est analysée dans cette recherche. À partir de ce dernier, il envisage les différentes alternatives disponibles en termes de rénovation énergétique. Par conséquent, divers scénarios de rénovation sont élaborés : isolation de la toiture, isolation des murs et remplacement des châssis et portes.

L'ACV est ensuite réalisée à partir de l'outil belge TOTEM. Cela permet d'identifier les solutions de rénovation les plus intéressantes d'un point de vue environnemental sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Dans le cadre de ce cas d'étude, vu que la maison a déjà 60 ans, Bodmer considère une durée de vie de 40 ans. Les indicateurs étudiés sont les suivants : le PRG, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des sols et de l'eau, l'eutrophisation, la formation d'ozone photochimique et l'épuisement des ressources abiotiques.

Ensuite, le CCV est réalisé. Il est établi à partir de la méthodologie MMG. Cette dernière a été développée par l'OVAM.

Enfin, il conclut que pour la rénovation des murs, en termes d'isolation, le matériau le plus avantageux d'un point de vue économique est la laine de verre en vrac KNAUF.

D'un point de vue environnemental, l'ouate de cellulose ISOCELL insufflée possède le plus faible impact environnemental. Néanmoins, le bardage en bois augmente considérablement son impact. Il serait judicieux qu'il soit recouvert d'un enduit. En ce qui concerne la toiture, l'isolation en ouate de cellulose ISOCELL semble être la solution la plus adéquate environnementalement et économiquement parlant. Pour terminer, les châssis en bois ou en aluminium sont plus rentables que ceux en PVC dont la durée de vie est plus courte. Au niveau environnemental, les châssis en bois sont les meilleurs. Il mentionne tout de même que quel que soit le système, la rénovation permet de diminuer de 80% l'impact environnemental par rapport au cas initial.

Tableau 2.3 - Synthèse des études similaires

Référence	Paramètres étudiés	Sujet	Gap Scientifique	Découvertes
(Balasbaneh & Bin Marsono, 2017)	Le potentiel de réchauffement global (PRG) via l'analyse du cycle de vie (ACV).	Comparaison des émissions de GES de six systèmes de construction. Analyse d'un cas d'étude dont la durée de vie est estimée à 50 ans. L'analyse est réalisée du berceau à la tombe.	Focalisé sur l'empreinte carbone, pas d'étude de coût. Étude propre au contexte malaisien.	Le système constructif le plus émissif est celui en bloc de béton. L'ossature en bois classique émet moins de dioxyde de carbone que les autres systèmes de construction.
(Motuzienė et al., 2016)	La demande énergétique primaire, le PRG et l'appauvrissement de la couche d'ozone via l'ACV. Le coût du cycle de vie (CCV).	Élaborer un processus de décision en estimant les impacts environnementaux et le CCV de trois alternatives (maçonnerie, rondin, ossature bois). Les éléments étudiés sont l'enveloppe et les différents systèmes	Étude de trois systèmes constructifs relatif au contexte belge à l'exception d'un. Étude propre au contexte lituanien.	Le système constructif en rondin est le plus attractif sauf en ce qui concerne le CCV. Le système traditionnel a le CCV le plus faible mais les résultats de l'ACV sont les plus élevés. Après pondération des critères étudiés, le bâtiment en rondin est le plus favorable et celui en traditionnel le plus défavorable.

(Sandanayake et al., 2018)	Le potentiel de réchauffement global (PRG) via l'analyse du cycle de vie (ACV)	Comparer les émissions de GES et l'énergie consommée du berceau à la porte pour un bâtiment en bois et en béton.	Analyse de l'étape de construction, pas de prise en considération de la totalité du cycle de vie du bâtiment. Durée de vie de 60 ans. Deux cas d'étude de contextes différents.	Les émissions engendrées par le cas d'étude en bois sont inférieures à celles du cas d'étude en béton.
(Azzouz et al., 2017)	L'épuisement des énergies fossiles, la demande d'énergie primaire et le potentiel de réchauffement global (PRG) via l'ACV.	Comparaison des impacts environnementaux de différents scénarios constructifs pour la structure, l'enveloppe et les systèmes opérationnels.	Focalisé sur l'empreinte carbone, pas d'étude de coût. Durée de vie de 60 ans. Étude propre au contexte du Royaume-Uni.	Économie d'émissions due au fait que l'ACV est réalisée à un stade précoce. L'utilisation de matériaux durables est le scénario qui présente la plus faible quantité d'émissions.
(Flager et al., 2012)	Le potentiel de réchauffement global (PRG) via l'analyse du cycle de vie (ACV) et le CCV.	Évaluer le CCV et l'empreinte carbone pour une série d'alternatives de conception de bâtiment afin de permettre aux parties prenantes du projet d'identifier les compromis entre la problématique environnementale et économique. Étude de l'enveloppe et des systèmes mécaniques.	La phase de démolition est négligée. Durée de vie de 30 ans. Étude propre au contexte de Géorgie. Diversification de variables de conception indépendante du système constructif	La variation de ces variables a permis une diminution du CCV de 5,1% mais une augmentation de l'empreinte carbone de 1,6%. À l'inverse, elle a également permis d'obtenir une solution moins émissive avec une diminution des émissions de carbone de 7,1% et du coût de 3,8%.
(Guardigli, 2014)	La santé humaine, la qualité des écosystèmes et les ressources via l'ACV	Comparer deux technologies différentes de construction (le bois et le béton) via l'ACV	Focalisé sur l'empreinte carbone, pas d'étude de coût.	Le bâtiment en bois affecte plus l'écosystème que le bâtiment en béton mais son impact sur les ressources et la santé humaine est moindre. Le bâtiment en bois présente un bilan énergétique global favorable.

(Nässén et al., 2012)	Le potentiel de réchauffement global (PRG) via l'analyse du cycle de vie (ACV) et le CCV.	Évaluer les coûts et le bilan carbone de bâtiments spécifiques dont les compositions de matériaux varient à deux périodes : 2010 et 2050.	Néglige la phase d'utilisation et les coûts liés à la phase de construction du bâtiment. Durée de vie de 100 ans. Étude propre au contexte suédois.	Les émissions de dioxyde de carbone du béton sont plus de deux fois plus grandes que celles du bâtiment en bois construit en 2010. Les coûts de dioxyde de carbone sont plus élevés en 2050 qu'en 2010 pour les deux bâtiments.
(Alshamrani, 2016)	La consommation d'énergie, le PRG ainsi que les émissions dans l'eau, le sol et l'air via l'ACV et CCV	Évaluer l'impact environnemental de huit combinaisons de structure en béton ou en acier de l'enveloppe d'un cas d'étude.	Durée de vie de 60 ans. Étude propre au contexte américain.	Au niveau du coût, le bâtiment en béton préfabriqué présente le coût le plus bas alors que les bâtiments dotés de murs rideaux présentent le coût le plus élevé. Les bâtiments en béton préfabriqué présentent les meilleures performances en termes de consommation d'énergie, de potentiel de réchauffement de la planète et d'émissions dans l'eau, l'air et le sol.
(Bodmer, 2020)	Le PRG, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des sols et de l'eau, l'eutrophisation, la formation d'ozone photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques.	Évaluer le coût du cycle de vie et l'ACV de différents scénarios de rénovation de l'enveloppe d'un cas d'étude afin de déterminer les matériaux et techniques les plus avantageux d'un point de vue environnemental et économique. Sur la totalité du cycle de vie du bâtiment. Sur une durée de vie de 100 ans.	Durée de vie de 100 ans. Étude de techniques de rénovation.	Quel que soit le système de rénovation, il permet de diminuer de 80% l'impact environnemental par rapport au cas initial. La configuration idéale est la mise en place de châssis en bois avec double-vitrage, l'isolation de la toiture en cellulose et celle des murs en fibres de laine et panneaux de polystyrène enduits.

2.3.1 Conclusion

L'état de l'art met en évidence les différents concepts et le contexte dans lequel s'inscrit cette recherche. Suite à ses engagements auprès de l'UE, la Belgique se doit de mettre en place une réglementation environnementale nationale telle que celle en vigueur en France, au Danemark, en Finlande et en Suède. Toutefois, malgré la nécessité croissante d'un tel cadre, en Belgique, aucun signe de politiques environnementales en termes d'émissions de GES ne semble actuellement voir le jour.

Au niveau environnemental, dans la littérature scientifique, de nombreuses études portent sur l'ACV dans le secteur de la construction. La majorité d'entre elles se focalise sur un cas d'étude unique dans son intégralité ou sur la comparaison de différents types de matériaux. Actuellement, peu d'entre elles se concentrent sur la comparaison de systèmes constructifs différents pour l'enveloppe d'un même cas d'étude. Par conséquent, il existe un manque dans l'évaluation des impacts environnementaux des alternatives et des techniques constructives disponibles sur le marché. De plus, peu d'études envisagent la totalité du cycle de vie du bâtiment. Seules certaines étapes du cycle de vie sont généralement considérées.

Ensuite, du point de vue des concepteurs, ces réglementations environnementales peuvent être perçues comme une pression supplémentaire ajoutée à celle du budget qui constitue un élément primordial pour le client. En effet, le choix de systèmes constructifs dont l'impact sur le réchauffement climatique est moindre peut engendrer des coûts plus élevés. Par ailleurs, peu d'études réalisent parallèlement l'ACV et la CCV afin d'évaluer l'impact économique causé par le choix de certains types de parois. Par conséquent, de nos jours, il est difficile d'évaluer le coût consécutif aux choix de systèmes constructifs dont les émissions de GES sont faibles.

Enfin, cette étude, dont la question de recherche est formulée comme suit : « Comment faciliter la comparaison de différentes techniques de construction durable au stade « Concept Design » d'un point de vue environnemental et économique pour les architectes soucieux de l'intégration environnementale ? », permet de réaliser une approche comparative afin de soutenir la prise de décision. De plus, elle pallie le manque de recherches qui comparent différents systèmes constructifs et qui évaluent tant l'impact environnemental qu'économique. Enfin, les résultats donnent la possibilité aux concepteurs d'orienter leurs choix à un stade précoce de l'élaboration d'un projet, en leur évitant de réaliser une ACV dont la méthodologie est longue et complexe.

3 Méthodologie

Cette Section présente les étapes principales de la méthodologie suivie lors de la réalisation de cette étude.

3.1 Processus du mémoire

Cette partie aborde les étapes clés propres à cette étude, c'est-à-dire l'analyse du cycle de vie et l'évaluation du coût. Ces étapes de la méthodologie mise en place permettent de répondre à la question de recherche principale et aux sous-questions de recherche. La question de recherche principale est exprimée de la manière suivante :

Comment faciliter la comparaison de différentes techniques de construction durable au stade « Concept Design » d'un point de vue environnemental et économique pour les architectes soucieux de l'intégration environnementale ?

Les sous-questions de recherche sont formulées comme suit :

1. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue environnemental ?
2. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue économique ?

Afin de répondre à ces questions, l'étude se base tout d'abord sur la réalisation de l'ACV d'un cas d'étude. Il s'agit du projet de construction d'une crèche à Beaufays, conçu par le bureau d'architecture liégeois Helium 3. Dans ce cas précis, l'ACV est réalisée uniquement sur les parois du volume protégé du bâtiment, à savoir la dalle de sol, le plancher sur extérieur, la toiture plate, la toiture inclinée et les murs extérieurs.

Étant donné que différents systèmes constructifs sont étudiés dans cette recherche, l'ACV est effectuée autant de fois qu'il y a de systèmes constructifs, c'est-à-dire cinq fois. Tout d'abord, l'ACV est réalisée pour un cas de base, c'est-à-dire celui dont le système constructif est traditionnel, il constitue le cas de comparaison. Ensuite, l'empreinte carbone des quatre variantes est calculée et comparée à celle du cas de base.

Trois logiciels d'ACV sont choisis afin d'évaluer l'impact environnemental du cas d'étude selon les différents systèmes constructifs. Par conséquent, l'ACV est réalisée sur chacun d'entre eux. Les résultats sont ensuite analysés et comparés afin de retenir l'outil qui semble le plus judicieux dans le cas de cette étude. Les trois outils utilisés sont les suivants : One Click LCA, TOTEM et Excel.

La seconde phase de l'étude consiste en l'estimation du coût de l'enveloppe fermée du cas d'étude selon la composition du cas de base et de celle des alternatives. Les coûts reprennent le prix du matériau lui-même et celui de la main d'œuvre. L'évaluation de ces derniers est réalisée manuellement sur Excel à partir d'un bordereau de prix unitaire.

Enfin, les résultats des deux analyses sont mis en parallèle afin d'élaborer des scénarios d'aide à la prise de décisions, tenant compte des problématiques environnementales et économiques.

3.2 Cadre conceptuel de l'étude

L'organigramme ci-dessous représente les différentes étapes de cette étude :

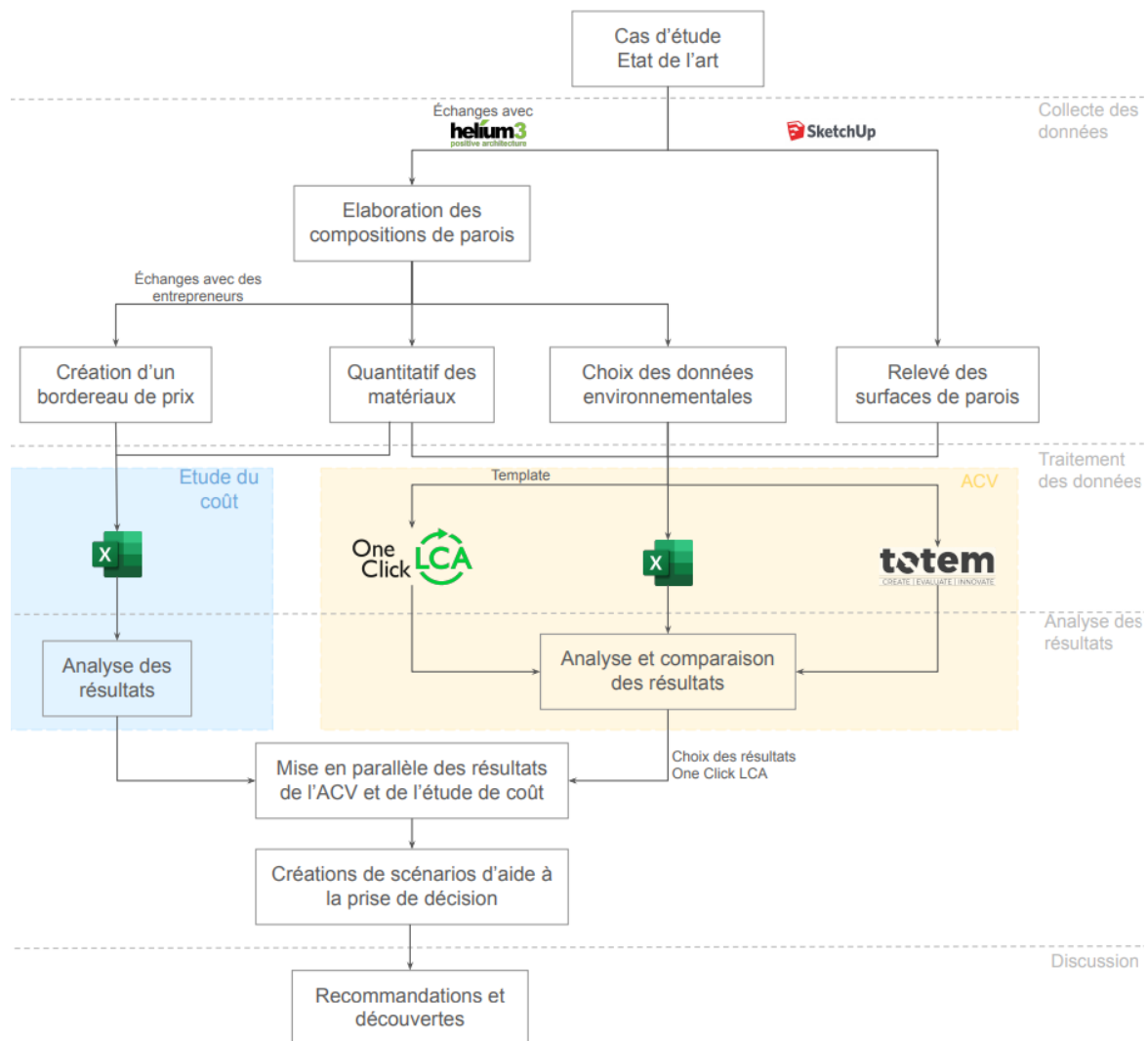


Figure 3.1 - Organigramme de la méthodologie

Dans un premier temps, comme expliqué dans la Section 1, dans le cadre du Plan Équilibre 2021-2026, la Région Wallonne a lancé un appel à projets. La proposition de projet du bureau d'architecture Helium 3 introduite par la commune de Chaudfontaine a été sélectionnée. Afin de respecter l'engagement de cette commune, Helium 3 se doit de concevoir un projet qui respecte des performances énergétiques strictes.

Suite à ces restrictions et conscient de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, le bureau d'architecture Helium 3 souhaite que je réalise une analyse chiffrée concrète de l'impact environnemental et du coût des différentes parois du volume protégé de leur projet qui constitue le cas d'étude de cette recherche. Ils souhaitent également que cette analyse soit intégrée tôt dans le processus de conception, à la phase « Concept Design » (RIBA, 2020) afin de pouvoir donner des orientations de systèmes constructifs aux concepteurs dès les premières phases d'élaboration.

Par conséquent, dans le cadre de cette recherche, quatre variantes de systèmes constructifs de l'enveloppe du cas d'étude sont comparées, d'un point de vue environnemental et économique, au système constructif traditionnel. L'ensemble de ces systèmes est décrit dans la Section 4.

L'état de l'art est une étape considérable qui donne tout d'abord la possibilité de se familiariser avec le contexte mondial, européen et national de l'ACV. Il permet notamment d'identifier les seuils et objectifs en vigueur à travers différentes réglementations au niveau national d'une part et européen d'autre part. Ensuite, il rend possible l'assimilation du cadre normatif général qui régit la question de recherche et principalement l'ACV des bâtiments. Il permet également de définir l'analyse du cycle de vie de manière générale et dans le secteur de la construction. De plus, il présente les différentes étapes à suivre et les données nécessaires à leur réalisation. Enfin, l'état de l'art est une aide importante pour une maîtrise plus pointue du sujet de l'étude et de la question de recherche principale.

Dans un second temps, afin de réaliser l'ACV et l'étude du coût des différentes alternatives, certains types de données doivent être collectées. Tout d'abord, à partir de la maquette numérique 3D SketchUp simplifiée du cas d'étude, un relevé de surface est effectué. Ensuite, l'élaboration des compositions de parois est réalisée suite à de nombreux échanges avec le bureau d'architecture Helium 3. Ces derniers ont notamment permis de récolter d'autres données nécessaires à cette recherche telles que les données environnementales spécifiques à chaque matériau, un quantitatif des matériaux utilisés et un bordereau de prix unitaires, pose comprise, réalisé à partir de remises de prix de différents entrepreneurs. Comme expliqué précédemment, l'état de l'art a permis d'identifier les données nécessaires à cette étude.

Dans un troisième temps, les données récoltées permettent de réaliser l'ACV et l'étude du coût. Cette dernière est réalisée à partir du bordereau de prix et du quantitatif des matériaux. Le coût de chaque paroi selon les différents systèmes constructifs est évalué manuellement à partir du logiciel Excel. Pour ce qui est de l'ACV, les données nécessaires sont le quantitatif des matériaux, le relevé de surface des parois et les données environnementales de chaque matériau étudié. Dans le cadre de cette étude, l'ACV est réalisée à partir de trois outils différents : Totem, Excel et One Click LCA. Ces derniers sont décrits dans la Section 2. Selon l'outil utilisé, les données collectées sont traitées et mises en forme différemment afin d'évaluer l'empreinte environnementale des parois et du bâtiment dans sa totalité. Ainsi, One Click LCA fournit un Excel Template à compléter et importer dans le logiciel. Les données doivent par conséquent être formatées sous la forme voulue afin d'être importées puis analysées.

Dans un quatrième temps, les résultats de l'étude du coût et de l'ACV sont analysés et comparés indépendamment les uns des autres, étant donné que l'ACV est réalisée à partir de trois outils différents. Après diverses analyses, les résultats provenant de One Click LCA sont conservés et mis en parallèle avec ceux de l'étude du coût. Des scénarios d'aide à la prise de décision sont ensuite élaborés.

Dans un dernier temps, suite à cette recherche, quelques recommandations et découvertes sont énumérées et détaillées.

3.3 Variables et indicateurs

Dans le cadre de cette étude, deux objectifs principaux sont visés :

- Évaluer l'impact environnemental des différentes parois selon les différents systèmes constructifs.
- Évaluer l'impact économique des différentes parois selon les différents systèmes constructifs

Les données d'entrée pour d'évaluer les impacts environnementaux et économiques dépendent d'une variable indépendante commune : le système constructif. En effet, les compositions de parois engendrées par les systèmes constructifs considérés vont influencer les résultats de cette étude. Quatre systèmes constructifs sont étudiés : traditionnel, traditionnel avec isolant biosourcé, CLT et ossature bois. Le Tableau ci-dessous définit le système constructif de toutes les parois de l'enveloppe du cas de base et des variantes.

Tableau 3.1 - Définition du système constructif des parois de l'enveloppe du cas de base et des variantes

		Traditionnel	Traditionnel + isolant biosourcé	CLT	Ossature bois
Cas de base	Dalle de sol	X			
	Plancher sur extérieur	X			
	Toiture plate	X			
	Toiture inclinée				X
	Mur extérieur	X			
Variante 1	Dalle de sol		X		
	Plancher sur extérieur		X		
	Toiture plate	X			X
	Toiture inclinée				X
	Mur extérieur				
Variante 2	Dalle de sol		X		
	Plancher sur extérieur		X		
	Toiture plate		X		
	Toiture inclinée				X
	Mur extérieur		X		
Variante 3	Dalle de sol			X	
	Plancher sur extérieur			X	
	Toiture plate			X	
	Toiture inclinée			X	
	Mur extérieur			X	
Variante 4	Dalle de sol				X
	Plancher sur extérieur				X
	Toiture plate				X
	Toiture inclinée				X
	Mur extérieur				X

À partir des systèmes constructifs étudiés, le PRG et le coût de chacun d'entre eux vont pouvoir être évalués. Ces derniers sont appelés variables dépendantes. Le PRG issu de la réalisation de l'ACV est réglementé par une série de normes internationales et européennes. Le Tableau ci-dessous synthétise les différentes variables étudiées, leurs indicateurs, les bases de données ainsi que les normes et standards qui les encadrent.

Tableau 3.2 – Variables de l'étude

Objectifs	Variables indépendantes (de cause)	Variables dépendantes (d'effets)	Normes et standards	Indicateurs (unités)	Base de données
Évaluer l'impact environnemental des différentes parois selon les différents systèmes constructifs	Système constructif	Potentiel de réchauffement climatique	EN 15804 EN 15978 ISO 14040 ISO 14044	Indicateur PRG kg CO ² eq	INIES Ecoinvent B-EPD
Évaluer l'impact économique des différentes parois selon les différents systèmes constructifs	Système constructif	Coût	-	Euros	Remise de prix d'entrepreneurs

3.4 Collecte des données

Afin de réaliser l'ACV et l'étude du coût du cas de base et des différentes alternatives, des données doivent être collectées.

Dans un premier temps, à partir de la maquette numérique du cas d'étude sous forme de modèle 3D Revit, une maquette simplifiée est réalisée sur SketchUp. Celle-ci considère l'enveloppe fermée du bâtiment sans ouverture quelconque. Cette dernière va permettre la réalisation d'un **relevé des surfaces** des différents types de parois étudiées.

Tableau 3.3 - Relevé des surfaces de parois

Type de parois	Surface
Dalle de sol	409 m ²
Plancher sur extérieur	104 m ²
Toiture plate terrasse	81 m ²
Toiture inclinée	517 m ²
Mur extérieur	865 m ²

Ensuite, en collaboration avec les membres du bureau Helium 3, les **compositions de parois** qui constituent le cas d'étude et les alternatives sont élaborées. Pour ce faire, des données sont directement collectées auprès du bureau d'architecture Helium 3. Parmi ces données brutes se trouvent :

- Des Excel regroupant les compositions de parois choisies dans leur projet de crèche
- Des Excel regroupant des compositions de parois selon les types d'ossatures souhaitées en accord avec des études antérieures
- La maquette numérique du bâtiment sous forme de modèle 3D Revit

Toutefois, comme mentionné dans la Section 3.7, afin de pouvoir comparer les parois entre elles, le coefficient thermique de ces dernières a été fixé à 0,20 W/m².K. Afin de respecter cette hypothèse, les épaisseurs d'isolants ont été adaptées à l'aide du logiciel PEB. Ce logiciel permet d'encoder les différentes compositions de chaque paroi qui se trouvent en Annexe afin de connaître leur conductivité thermique. Les épaisseurs d'isolant étant adaptées afin de respecter l'hypothèse ci-dessus. Les compositions de parois vont permettre de :

- Réaliser des **quantitatifs de matériaux**.

En effet, afin de réaliser l'ACV des parois de l'enveloppe, la quantité de matériaux utilisée doit être connue. Celle-ci dépend des compositions des parois et du relevé des surfaces. Étant donné que dans cette recherche, cinq parois sont étudiées selon cinq systèmes constructifs, 25 quantitatifs différents sont réalisés.

- Choisir les **données environnementales**.

Comme expliqué dans la Section 2, afin de calculer l'impact environnemental d'un bâtiment, les quantités de matériaux doivent être multipliées par les données environnementales spécifiques de chacun d'entre eux. Ces données sont issues des FDES et des DEP disponibles dans les bases de données. Les FDES et DEP peuvent être propres à un produit issu d'un fabricant précis, couvrir un même type de produit issu de plusieurs fabricants ou être par défaut. Dans la mesure du possible, les données environnementales collectées correspondent à un produit spécifique.

Dans le cadre de cette étude, l'ACV est réalisée à l'aide de trois outils différents : One Click LCA, TOTEM et Excel. Par conséquent, chacun d'entre eux ne dispose pas des mêmes bases de données. Néanmoins, afin de rendre les résultats des ACV de ces trois outils comparables, je pensais utiliser une base commune de données. Toutefois, le manque d'accessibilité de certaines ne l'a pas permis. Ces dernières sont détaillées et évaluées ultérieurement.

- Réaliser un **bordereau des prix unitaires**, pose comprise.

L'étude du coût nécessite le relevé des prix unitaires des matériaux de chaque paroi afin de pouvoir estimer l'impact économique en fonction des quantités de matériaux utilisés. Au début, le bordereau des prix unitaires ABEX de l'édition 2023 (ABEX, 2023) a été utilisé. Néanmoins, ce dernier ne compte qu'un nombre limité de matériaux. Ceux-ci n'étaient pas suffisamment représentatifs pour pouvoir être exploités dans cette étude. Cette base de données a donc été mise de côté.

L'UPA met également à disposition un bordereau des prix unitaires. Le dernier remonte à 2020 (UPA, 2020). En raison de la crise sanitaire, de la guerre en Ukraine et d'autres faits qui ont eu lieu depuis 2020, la prise en compte de l'inflation n'a pas été considérée comme suffisante pour évaluer les prix actuels que nous connaissons en 2023.

Par conséquent, je me suis adressée directement à différents entrepreneurs afin qu'ils me fournissent des remises de prix pour chaque matériau étudié. Au vu des grandes variabilités de coût à l'unité, une moyenne a été effectuée afin de réaliser un bordereau spécifique à cette étude.

3.4.1 One Click LCA et Excel – INIES

Comme expliqué dans la Section 2, One Click LCA compte plus de 200000 données provenant de bases de données internationales telles que INIES et Ecoinvent.

La base de données internationale la plus utilisée est Ecoinvent. En effet, cette dernière est reconnue scientifiquement. Néanmoins, son accès nécessite une licence particulièrement coûteuse et je n'ai pas pu y accéder. Par conséquent, j'ai décidé de me servir de la base de données française INIES qui est la base de données nationale de référence. Elle met gratuitement à disposition plus de 4 000 FDES de produits de construction conformes à la norme 15804. Elle est utilisée pour réaliser l'ACV tant sur One Click LCA que sur Excel. De cette manière, les données environnementales d'entrées sont identiques pour effectuer l'ACV sur ces deux logiciels.

3.4.2 TOTEM – Ecoinvent et B-EPD

Comme expliqué dans la Section 2, dans sa bibliothèque, TOTEM dispose de deux types de données provenant de deux bases de données différentes (Trigaux & Lam, 2023). Dans le cadre de cette étude, en raison du peu de données disponibles dans TOTEM, elles sont toutes deux utilisées.

Les données génériques sont issues de la base de données suisse Ecoinvent 3.6. Cette dernière dispose de plus de 20 000 données d'activités qui couvrent un grand nombre de secteurs différents, tant au niveau mondial que régional. Néanmoins, comme dit précédemment, seule une série de données génériques assez limitée est disponible dans TOTEM. Ce dernier a, en effet, sélectionné des données représentatives de l'Europe occidentale qui sont harmonisées au contexte belge. TOTEM ne donne donc pas accès à la base de données Ecoinvent en tant que telle, mais uniquement aux données qu'il a insérées dans sa propre bibliothèque.

Les autres matériaux présents dans la bibliothèque TOTEM sont basés sur les DEP. Ces dernières proviennent de matériaux de construction commercialisés ou produits en Belgique. Les fabricants doivent disposer de données environnementales déclarées sous la forme B-EPD afin de faire apparaître leur produit dans la base de données belge. B-EPD est la base de données fédérale belge du Service Public Fédéral. TOTEM dispose de ces données environnementales depuis 2020. TOTEM compte 77 DEP (TOTEM, s. d.).

3.5 Évaluation de la qualité des données




Dans leur recherche, Weidema & Wesnaes définissent cinq indicateurs pour évaluer la qualité des données utilisées (Weidema & Wesnaes, 1996).

Tableau 3.4 – Les cinq indicateurs de qualité des données définis par Weidema & Wesnaes (Castagné, 2023)

Fiabilité	Quelles sources ont été considérées ? Par quelle méthode d'acquisition les données ont-elles été récupérées ? Avec quelles procédures de vérification ?
Complétude	L'échantillon choisi est-il représentatif ? Y'a-t-il assez de données dans l'échantillon ?
Corrélation temporelle	Est-ce que les données utilisées sont assez récentes ?
Corrélation géographique	Est-ce que les données correspondent à la localisation du projet ?
Corrélation technique	Est-ce que les données sont représentatives de l'entreprise ? Est-ce que les données correspondent aux produits réels ?

Étant donné que dans cette recherche l'ACV est réalisée à partir de trois outils différents, les cinq indicateurs définis ci-dessus sont utilisés dans cette étude afin d'estimer la qualité des données utilisées par chaque logiciel. Cette évaluation permettra ensuite de choisir le logiciel d'ACV dont la qualité des données est la meilleure, afin de pouvoir analyser ses résultats plus précisément. Le Tableau ci-dessous synthétise cette estimation.

Tableau 3.5 - Critère de qualité de l'analyse du cycle de vie des trois outils d'ACV

			
Base de données	INIES	Ecoinvent 3.6 B-EPD	INIES
Fiabilité	Les FDES sont conformes à la norme ISO 15804 (INIES, s. d.).	Les EPD sont conformes à la norme ISO 15804 (TOTEM, s. d.).	Les FDES sont conformes à la norme ISO 15804 (INIES, s. d.).
Complétude	Oui, plus de 4 000 FDES disponibles (INIES, s. d.).	Nombre très limité de données environnementales.	Oui, plus de 4 000 FDES disponibles (INIES, s. d.).
Corrélation temporelle	Selon la norme ISO 15804, la validité des FDES est de cinq ans (CEN, 2021). Les données datent au plus tard	Les données de Ecoinvent datent de 2019. Selon la norme ISO 15804, la validité des DEP est de cinq ans	Selon la norme ISO 15804, la validité des FDES est de cinq ans (CEN, 2021). Les données datent au

	de 2018.	(CEN, 2021). Les EPD de B-EPD datent au plus tard de 2018. Elles sont mises à jour sur TOTEM deux fois par an (SPF, 2022).	plus tard de 2018.
Corrélation géographique	Données environnementales adaptées au contexte français mais prise en compte d'un facteur de compensation local. Les scénarios de transport et de fin de vie sont adaptés à la localisation du projet (One Click LCA, s. d.).	D'après TOTEM, les données issues de Ecoinvent sont harmonisées au contexte de la construction belge (TOTEM, s. d.). B-EPD contient des EPD de produits de construction du marché belge (Service Public Fédéral (SPF), 2022).	Données environnementales adaptées au contexte français.
Corrélation technique	Données représentatives de l'entreprise et du produit souhaité	Données pas suffisamment représentatives de l'entreprise et du produit souhaité	Données représentatives de l'entreprise et du produit souhaité

Malgré cette évaluation, l'ACV a été réalisée entièrement sur ces trois outils. Les résultats ont ensuite été comparés. Néanmoins, la suite de l'analyse des résultats de l'ACV de cette étude se concentre exclusivement sur ceux provenant du logiciel One Click LCA. En effet, l'évaluation réalisée ci-dessus sur base des cinq indicateurs définis par Weidema & Wesnaes permet d'affirmer que la qualité des données utilisées dans cet outil est meilleure que celle des données utilisées sur TOTEM ou Excel.

3.6 Traitement et analyse des données

3.6.1 Analyse du Cycle de Vie (ACV)

3.6.1.1 One Click LCA

One Click LCA propose de créer un projet et différentes conceptions pour ce même projet. Étant donné que cette étude évalue l'impact environnemental d'un cas de base et de quatre variantes, cinq conceptions sont élaborées.

Toutefois, avant de pouvoir être analysées, les données nécessaires à la réalisation de l'ACV sur One Click LCA, telles que les compositions de parois, les épaisseurs de chaque matériau et les quantités de produits sont triées et mises en forme sur différents Excel. Ces données sont ensuite formatées selon l'Excel Template fourni par One Click LCA avant d'être importées dans ce dernier. Cinq Excel Template correspondant au cas de base et aux quatre variantes sont réalisés puis importés chacun dans la conception qu'ils représentent. La section « Sélection sous-lot » m'a permis de catégoriser les matériaux en fonction de la paroi dans laquelle ils se trouvent. De cette manière, j'ai pu obtenir des résultats pour la totalité du bâtiment mais également par types de parois.

SELECTION SOUS-LOT	SOUS-LOT	CLASS	Description matériau	Quantité	Unité	Epaisseur mm	Commentaire
2.1 Fondations	2.1	FOUNDATIO	Geotextile	200	M2	10	Fabricant
2.1 Fondations	2.1	FOUNDATIO	Empierrement	200	M2	200	Fabricant
2.1 Fondations	2.1	FOUNDATIO	Sable stabilisé	200	M2	50	Fabricant
3.1 Éléments horizontaux - Planchers,	3.1	SLAB	Membrane PE	200	M2	0,4	Fabricant
3.1 Éléments horizontaux - Planchers,	3.1	SLAB	Dalle en béton armé	200	M2	200	Fabricant
3.1 Éléments horizontaux - Planchers,	3.1	SLAB	Préchape	200	M2	80	Fabricant
3.1 Éléments horizontaux - Planchers,	3.1	SLAB	Isolation thermique en Liège	200	M2	210	Fabricant
3.1 Éléments horizontaux - Planchers,	3.1	SLAB	Membrane acoustique	200	M2	10	Fabricant

Figure 3.2 - Exemple du Template One Click LCA (One Click LCA, s. d.)

Lorsque ce Template est importé sur le logiciel, One Click LCA associe automatiquement chaque quantité de matériaux à des données environnementales. Ces dernières proviennent de DEP ou FDES présentes dans la bibliothèque du logiciel. Comme expliqué dans la Section 2, One Click LCA compte plus de 200000 données provenant de bases de données internationales mais celle choisie pour cette étude est INIES. Par conséquent, la majorité des DEP et FDES ont dû être sélectionnées manuellement. L'ACV se fait par itérations, jusqu'à obtenir des valeurs de potentiel de réchauffement global des différentes parois cohérentes et plausibles.

Les résultats obtenus via One Click LCA sont triés afin de n'en retirer que les valeurs utiles à l'étude, c'est-à-dire en relation avec le PRG. Elles sont ensuite résumées sur un Excel afin d'en faire des tableaux comparatifs et des diagrammes intuitifs.

3.6.1.2 TOTEM

Le traitement et l'analyse des données sur TOTEM se font de manière différente. Tout d'abord, ce logiciel propose de créer des projets. Par conséquent, cinq projets ont été élaborés.

Dans un second temps, dans chaque de ces projets sont créées les différentes parois étudiées selon leur composition respective. Dans sa bibliothèque, ce logiciel propose différents complexes de parois tout faits. Chaque élément qui les compose peut ensuite être adapté (modification de l'épaisseur) ou remplacé par un autre matériau. La Figure ci-dessous représente une dalle de sol proposée dans la bibliothèque TOTEM.

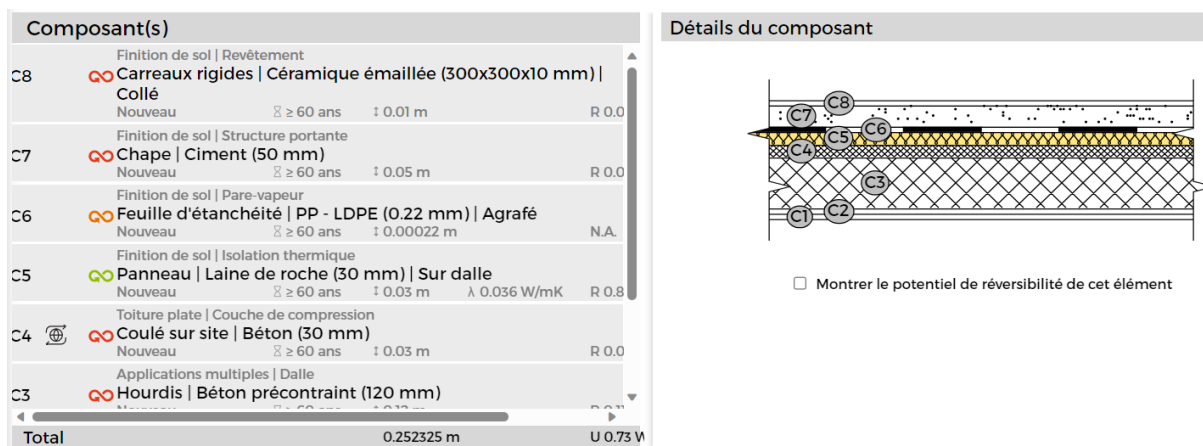


Figure 3.3 - Exemple de dalle de sol proposée dans la bibliothèque TOTEM (TOTEM, s. d.)

Ensuite, le bâtiment peut seulement être conçu. Différentes informations sur le projet doivent être communiquées comme la surface de plancher utile, le volume, le nombre d'habitants ou d'utilisateurs, etc.

Enfin, le bâtiment est élaboré à partir des parois créées et préalablement sélectionnées pour en faire partie. Un rapport de résultat peut ensuite être téléchargé.

3.6.1.3 EXCEL

Enfin, afin de réaliser l'ACV sur Excel, il faut le programmer manuellement. En effet, réaliser une ACV sur Excel permet de faciliter et rendre plus rapide l'ACV. Néanmoins, il faut concevoir soi-même l'outil de manière conforme aux normes qui encadrent l'ACV. On le complète ensuite par les quantités et données environnementales de chaque matériau, issues des FDES de la base de données INIES.

3.6.2 Étude du coût

L'analyse des données afin de réaliser l'étude du coût est relativement simple. Afin de faire correspondre les unités, le quantitatif des matériaux est adapté aux unités par rapport auxquelles les entrepreneurs ont fourni des prix de matériaux. Ces deux données sont ensuite multipliées sur Excel afin d'évaluer le coût par paroi et pour le bâtiment dans sa totalité. Ces résultats sont synthétisés dans des Tableaux qui permettent de réaliser des diagrammes présentés dans la Section 5.

3.7 Hypothèses de l'étude

3.7.1 La durée de référence du bâtiment (DVR)

La période d'étude analysée est de 50 ans car elle correspond à la durée moyenne de la phase d'exploitation d'un bâtiment avant qu'il ne nécessite de lourdes rénovations. Néanmoins, le logiciel TOTEM impose une durée de vie égale à 60 ans (TOTEM, s. d.). Par conséquent, l'ACV sur TOTEM prend en compte une durée de vie supérieure à celle de One Click LCA et Excel.

3.7.2 Indicateurs environnementaux

Dans le cadre de cette étude, seul le potentiel de réchauffement climatique (GWP), dont l'unité est le kg.CO².éq, est étudié comme impact environnemental. Comme expliqué en introduction, le GWP risque d'être réglementé en Belgique d'ici à quelques années, comme c'est déjà le cas en France, où le Guide RE2020 impose des seuils maximaux.

3.7.3 Les étapes du cycle de vie

Les étapes du cycle de vie étudiées sont les suivantes :

- A1 à A3
- A4 à A5
- B1 à B5 : La phase d'utilisation est considérée à l'exception des consommations d'eau et d'énergie qui sont estimées égales quel que soit le système constructif étudié. Elles sont par conséquent négligées.
- C1 à C4

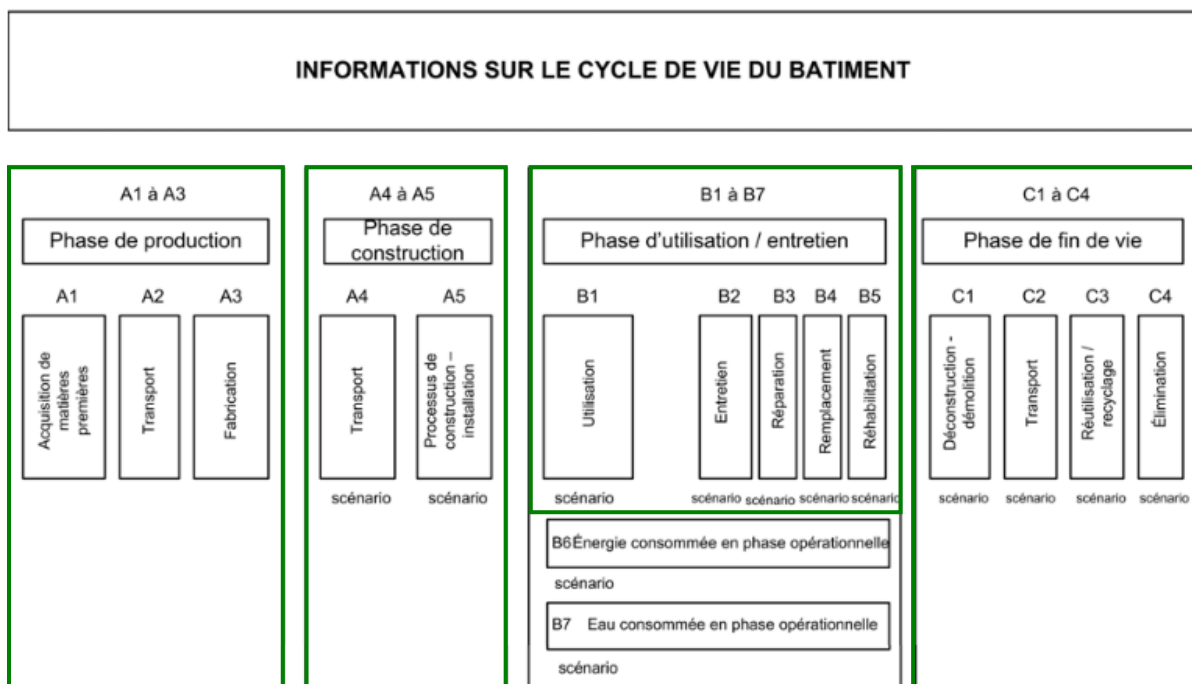


Figure 3.4 - Les différentes phases de l'ACV d'un bâtiment (CEN, 2012) considérées dans cette étude

3.7.4 Le coefficient de transfert thermique

Le coefficient de transfert thermique est identique pour toutes les parois et pour toutes les compositions de parois ($U = 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$) afin de pouvoir comparer les résultats entre eux.

3.7.5 Phase de projet

La phase de projet considérée est la phase « Concept Design ». Étudier l'ACV à cette étape permet d'anticiper les évaluations imposées par le Guide RE2020.

4 Cas d'étude et systèmes constructifs

Ce chapitre présente le bureau d'architecture Helium 3, ainsi que le projet dans lequel ils se sont engagés. Pour ce faire, différents points sont abordés tels que le site du cas d'étude, le programme, les choix d'implantation, le concept, etc.

4.1 Contexte

Le bureau d'architecture Helium 3 œuvre à concevoir des architectures positives. Conscients de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, ils ont à cœur de proposer aux clients des solutions les plus écologiques possibles. Toutefois, ces choix ont des impacts budgétaires qu'il serait intéressant de quantifier pour l'ensemble des parois. C'est dans ce cadre que ce bureau m'a proposé de réaliser un travail de fin d'étude sur un projet concret pour lequel ils ont des exigences strictes à respecter quant aux matériaux d'isolation utilisés. En effet, comme expliqué dans la Section 1, en vue d'obtenir des subsides, ils se sont engagés à concevoir un bâtiment à énergie positive dont l'enveloppe est composée de 95% d'isolants bio sourcés (Bureau d'architecture Helium 3, 2023b).

La commune de Chaudfontaine dispose actuellement d'une série de crèches dont la capacité est limitée. C'est pourquoi elle ne peut pas répondre à la demande croissante en termes de places d'accueil. De plus, la construction de nouveaux quartiers d'habitation à Beaufays est planifiée pour les prochaines années, ce qui risque d'accentuer le problème actuel vu l'arrivée probable de jeunes ménages. C'est dans ce contexte que la commune de Chaudfontaine, suite au nouveau « Plan Équilibre 2021-2026 » lancé par l'ONE, a proposé sa candidature (Bureau d'architecture Helium 3, 2023b).

4.2 Site et implantation

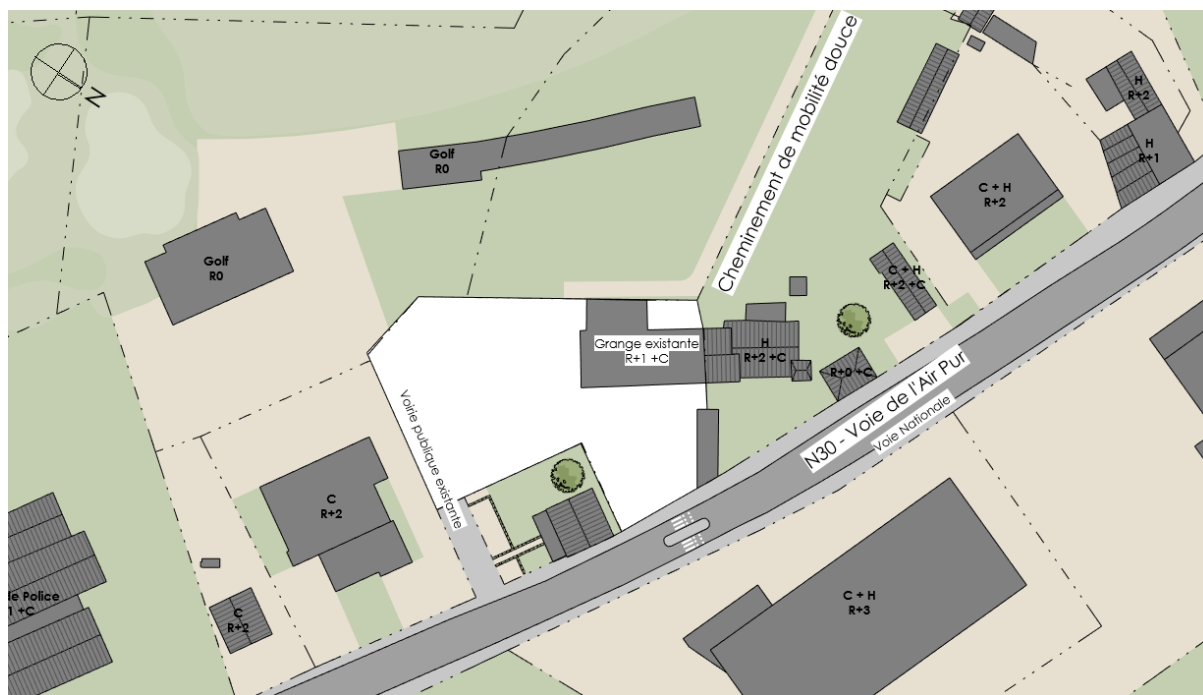


Figure 4.1 - Plan du site du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a)

La parcelle, qui appartient à la commune de Chaudfontaine, se situe le long de la voie de l'Air Pur à Beaufays. Sur cette dernière est construite une grange dans la continuité de la ferme érigée sur la parcelle attenante, à l'ouest du site. Sur la parcelle voisine située au nord-est se trouve un bâtiment qui compte une série de logements, tandis que sur celle située côté sud-ouest, à l'arrière du site, un futur golf est en cours d'aménagement. Enfin, de l'autre côté de la voirie, se trouvent un bâtiment commercial et des logements. En ce qui concerne l'accessibilité, celle-ci sera assurée par la future voie publique qui desservira le futur golf. De plus, un cheminement à mobilité douce traversera le site (Bureau d'architecture Helium 3, 2023b).

L'implantation du projet a été conditionnée par les différents modes de circulation présents sur le site. Étant donné que le tracé de la venelle et l'accès au golf par la prolongation de la route sont déjà fixés, le bureau Helium 3 a décidé d'en profiter en minimisant les surfaces supplémentaires dédiées aux voitures. De cette manière, ils s'assurent de conserver un maximum d'espace aux piétons.

Le positionnement de la venelle permet de la garder à distance de la circulation automobile et des habitations, et ainsi de garantir la sécurité. Elle est notamment accessible via un passage pour piétons sur la Voie de l'Air Pur. Néanmoins, ce cheminement à mobilité douce coupe la parcelle en deux.

Afin de bénéficier d'une bonne orientation solaire, de profiter des vues sur le golf, de garantir une sécurité optimale et de favoriser l'accès, le bureau d'architecture Helium 3 a pris le parti de placer la crèche sur la partie sud du site.

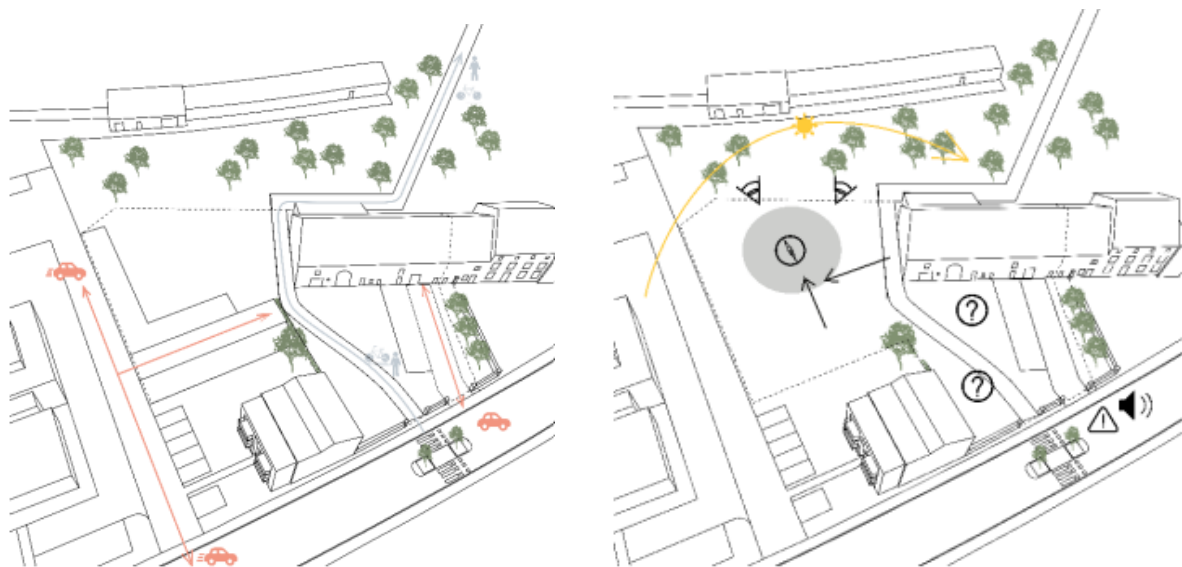


Figure 4.2 - Schémas d'implantation 1 et 2 du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2022)

La zone nord accueille la zone de parking, l'entrée du bâtiment accessible depuis ce dernier et un espace de rencontre végétalisé le long du cheminement à mobilité douce. Cet espace vert récréatif accessible à tous est en cohérence avec le concept de « Ma crèche à la ferme » (Bureau d'architecture Helium 3, 2022).

Également en rapport avec leur concept, Helium 3 a décidé d'implanter leur projet dans la continuité de la grange existante, offrant une orientation nord/sud aux façades principales du bâtiment. La zone sud permet notamment de créer des espaces extérieurs dédiés à la crèche. Ces espaces sont orientés vers la nature et le calme (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).



Figure 4.3 - Schémas d'implantation 3 et 4 du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2022)

Afin de s'intégrer au mieux au contexte existant, le bâtiment est constitué d'un volume simple et longiligne, à toiture en double pente. Le bâtiment est composé de portiques en bois dont les espacements sont identiques. Ces derniers rappellent la charpente traditionnelle en bois des granges. Ils permettent notamment d'avoir une grande surface exploitable sous la toiture et de limiter l'emprise au sol en concevant un projet compact (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).

En ce qui concerne les façades, afin de respecter le concept de la ferme, le bureau d'architecture Helium 3 a opté pour des matériaux d'aspect et de teintes naturels. Pour cette raison, ils ont choisi de travailler avec un bardage en fibre-ciment, ce qui permet notamment de garantir la réaction au feu et un entretien maîtrisé. En toiture, le choix s'est porté sur des tuiles en terre cuite d'une teinte similaire aux briques de la grange attenante (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).



Figure 4.4 – Modélisation 3D du cas d'étude (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a)

4.3 Contraintes et législations spécifiques

La conception de ce projet a été guidée par les législations en vigueur afin qu'il soit recevable auprès des différentes instances.

Tout d'abord, en plus d'être desservi par un ascenseur, la totalité du bâtiment doit être accessible aux personnes à mobilité réduite. Ensuite, les différentes recommandations d'hygiène de l'AFSCA liées à la distribution des repas, doivent être suivies. De plus, ce projet doit suivre la norme Quasi Zéro Énergie (Q-ZEN), appliquée aux bâtiments publics depuis 2019, qui impose des contraintes de niveau de l'isolation notamment. Le projet a été également conçu en respectant la norme incendie de base. Enfin, ce projet doit respecter les différentes exigences mentionnées dans l'arrêté de la communauté française portant approbation des modalités fixées par l'ONE (Bureau d'architecture Helium 3, 2022).

4.4 Techniques spéciales

Un bureau d'études a été missionné pour réaliser l'étude des techniques spéciales. De cette étude sont ressorties différentes solutions (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a) :

- La production de chaleur est assurée par une pompe à chaleur dont la régulation est centralisée. Les éléments émetteurs sont des ventilo-convecteurs et du chauffage par le sol.
- La production d'eau chaude sanitaire est assurée via des boilers électriques sous les éviers et via une production instantanée pour les douches des vestiaires.
- Le projet nécessite un groupe de ventilation double-flux avec récupération de chaleur.
- Le refroidissement se fait par l'intermédiaire du chauffage sol et de la ventilation nocturne.

4.5 Programme et aménagement intérieur

Le projet étudié consiste en la réalisation d'une crèche constituée de 4 services comptant 14 enfants chacun dans lesquels les normes ONE imposent un espace jeux équivalent à 4 m² par enfant ainsi qu'une zone dortoir dont les dimensions respectent 2 m² par enfant. Le maître d'ouvrage souhaite également un espace jeu polyvalent ainsi que des locaux de rangement en suffisance. Au niveau administratif, le programme compte quatre bureaux dont un qui dispose d'une zone de change afin qu'il soit dédié à la consultation des enfants. En ce qui concerne les locaux techniques, ce projet compte des sanitaires, des vestiaires avec douches, un local d'entretien, une cuisine et une buanderie. À tous ces espaces s'ajoutent un premier espace dédié au personnel et un second aux stagiaires. Enfin, un espace extérieur est prévu et aménagé avec des rangements (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).

Le bureau Helium 3 propose de développer le projet autour d'un concept fort qui retrace l'histoire du lieu, tout en étant ludique et pédagogique pour les enfants : « Ma crèche à la ferme ».

Le projet est divisé en trois niveaux. Au rez-de-chaussée se trouve l'entrée principale pour le public, accessible depuis le parking et la venelle piétonne, qui permet de desservir les deux premiers services situés au rez-de-chaussée.

Au sein de celle-ci se trouve un escalier ouvert, qui permet de desservir l'étage supérieur où se trouvent les deux seconds services. L'ensemble des pièces s'articule donc autour de cet espace central, visible depuis l'extérieur grâce à sa grande baie vitrée.

Le dernier niveau est quant à lui accessible par un escalier « fermé ». Ce niveau, dédié au personnel, regroupe les vestiaires, un espace détente, etc. L'escalier de secours extérieur est une seconde option afin d'atteindre ce dernier étage sans pour autant passer par la partie publique du bâtiment. Certains espaces ont néanmoins des accès indépendants telle que la cuisine, facilement accessible depuis la voirie et le parking. L'ensemble des plans et une série de coupes se trouvent en Annexe.

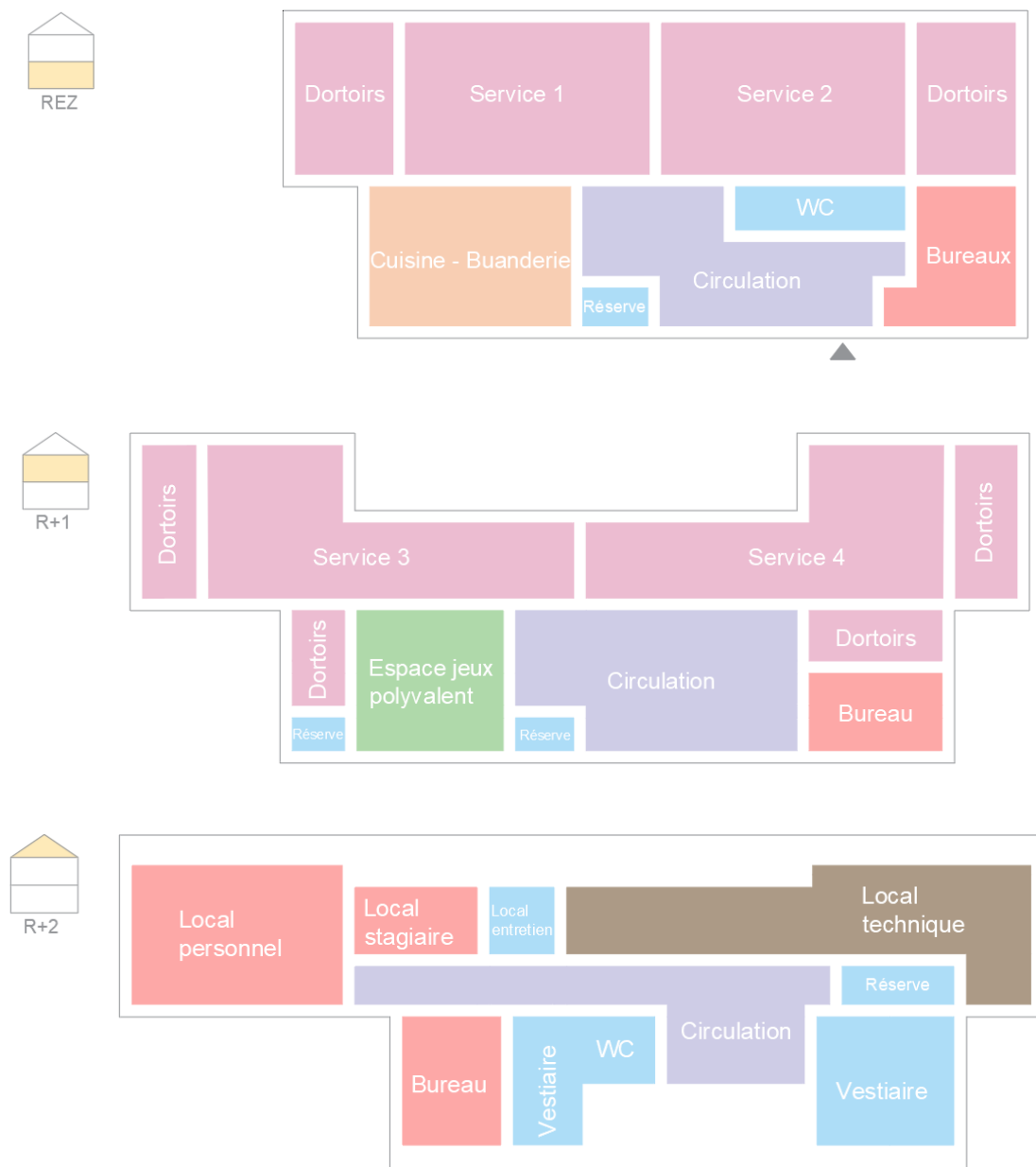


Figure 4.5 - Schémas d'organisation intérieure du cas d'étude

4.6 Problématique des isolants biosourcés

D'autres éléments tels que la lutte contre la surchauffe, des objectifs énergétiques, etc. guident également les choix de conception du bureau. Ils accordent énormément d'importance à l'ensemble des aspects du développement durable lors de l'élaboration de leurs projets. Néanmoins, en fonction des projets et des maîtres d'ouvrage, ils mettent l'accent sur certains points.

Dans le cas étudié ici, une attention particulière a été portée sur l'utilisation d'éco-matériaux. Comme déjà expliqué précédemment, la commune de Chaudfontaine s'est engagée à utiliser un minimum de 95% d'isolants en éco-matériaux sur l'enveloppe du projet. Afin d'y parvenir, différents éléments ont été mis en place.

Tout d'abord, les murs et toitures inclinées seront réalisés en ossatures bois. Ces dernières seront remplies d'un isolant faisant partie de la liste des isolants biosourcés, l'ouate de cellulose. L'utilisation d'un tel isolant pour ces deux types de paroi permet d'assurer 70% d'isolants en éco-matériaux sur l'enveloppe du bâtiment. Afin d'obtenir les 95% exigés, il faut trouver une solution afin d'isoler le plancher sur sol. Une solution envisagée a été de mettre le bâtiment sur pilotis ce qui permettrait de réaliser un plancher en gitage bois avec une isolation en vrac telle que la cellulose. Néanmoins, cette solution est moins bonne qu'une dalle de sol d'un point de vue énergétique et en ce qui concerne l'inertie thermique qui permet de lutter contre la surchauffe. Pour ces raisons ainsi que celle de l'accès PMR, cette solution n'a pas été envisagée. Afin de tenir ses engagements, le bureau a cherché une alternative écologique au polyuréthane projeté pour isoler les dalles. Lors du permis, la liste officielle des isolants biosourcés de la Région Wallonne ne comptait aucun produit compatible avec une dalle de sol. Néanmoins, depuis peu, le liège de la marque KENOVEL, a obtenu le label « produit biosourcé » et peut-être utilisé comme isolant en dalle de sol (Bureau d'architecture Helium 3, 2023b).

4.7 Système constructif du cas de base et des variantes

Cette Section décrit l'ensemble des systèmes constructifs du cas de base et des alternatives des différents types de parois étudiées. Les détails constructifs se trouvent en Annexe. Comme expliqué dans la Section 3, cette recherche se concentre sur l'enveloppe du bâtiment. Les parois étudiées sont les suivantes : la dalle de sol, les planchers sur extérieur, les toitures plates, les toitures inclinées et les murs extérieurs. Ces parois sont mises en évidence dans la Figure 4.6, qui représente le volume du cas d'étude.

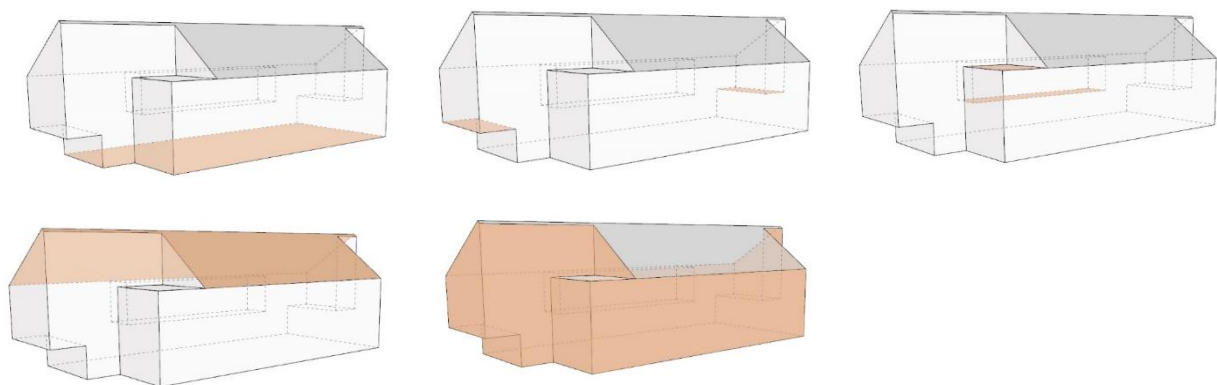


Figure 4.6 – Mise en évidence des parois étudiées

4.7.1 Cas de base : Ossature traditionnelle avec isolant classique

Le système constructif choisi par le bureau d'architecture Helium 3 permet de garantir la maîtrise des détails en atelier, de réduire les nuisances sur chantier, tout en créant moins de déchets et en garantissant un système compatible avec les isolants biosourcés. De cette manière, le bâtiment profite d'une isolation performante et d'une bonne inertie. Cette dernière permet de limiter les pics de température en accumulant de la chaleur ou de la fraîcheur dans les planchers lourds afin de la restituer ensuite avec un certain déphasage dans le temps.

Au niveau structurel, le cas d'étude est construit à partir de planchers lourds et de colonnes en béton. En effet, l'objectif est de concevoir un bâtiment qui peut accueillir des évolutions dans le temps. Cette flexibilité d'aménagement est assurée par son plan libre. De plus, ce type de plancher assure une résistance au feu entre les étages et permet d'obtenir de bonnes performances acoustiques.

Enfin, l'ossature en bois préfabriquée des murs extérieurs permet de supporter la toiture et les éléments de façade (Bureau d'architecture Helium 3, 2023a).

4.7.2 Variante 1 : Système constructif mixte

Le système constructif de la première variante est le plus classique. La dalle de sol est constituée d'un radier et isolée avec un isolant en polyuréthane (PUR). Ensuite, le plancher sur extérieur et la toiture terrasse sont réalisés à partir de hourdis en béton. L'isolation du premier s'effectue à partir de panneaux de PUR tandis que celle du second s'effectue en PIR. En ce qui concerne la toiture, celle-ci est réalisée en ossature bois avec une isolation en cellulose insufflée. Afin d'améliorer les performances acoustiques, une isolation en laine d'herbe est installée côté intérieur de la paroi. Enfin, les murs sont constitués de blocs de béton et isolés grâce à du PUR.

4.7.3 Variante 2 - Ossature traditionnelle avec isolant biosourcé

Cette variante est identique à la précédente, hormis le choix des isolants. Dans ce cas, ceux utilisés sont des isolants biosourcés tels que le liège, les fibres de bois, la laine d'herbe, etc. L'emploi de certains d'entre eux nécessite une sous-structure supplémentaire puisqu'ils ne sont pas rigides. Les isolants biosourcés utilisés sont tous labellisés produits biosourcés.

4.7.4 Variante 3 - Ossature en CLT

Les constructions en CLT (Cross Laminated Timber) sont réalisées à partir de panneaux multicouches en bois lamellé collé croisé. Les plaques sont collées entre elles de manière croisée afin d'assurer une meilleure stabilité et résistance. Dans le cas de ce type de construction, l'isolant est placé du côté extérieur, le CLT pouvant donc servir de finition intérieure (Blondeau-Patissier, 2015).

Parmi les avantages du CLT se trouvent notamment sa rapidité de mise en œuvre, sa massivité qui assure une très bonne isolation thermique et la possibilité d'évolution de la construction dans le futur (Blondeau-Patissier, 2015).

4.7.5 Variante 4 - Ossature en bois

Le système constructif de ce type d'ossature est composé de montants verticaux. Ces éléments en bois de petites sections, dont l'entraxe est faible, sont placés selon une trame régulière. Ils sont ensuite reliés par des éléments horizontaux de même section. Sur cette ossature sont fixés des panneaux en bois de type OSB, par exemple, qui assurent le contreventement du bâtiment. L'isolant, généralement sous forme de panneaux, est placé entre les montants verticaux et les panneaux. Ces ossatures sont capables de supporter le plancher et la toiture plate ou inclinée du bâtiment et sont réalisées à partir du même principe : des éléments longilignes de petites sections placés selon un entraxe régulier et de faible dimension. Toutefois, l'utilisation du bois empêche la réalisation d'une fondation sur le sol. En effet, ce type de construction est généralement effectué sur pilotis.

Enfin, le choix du bois, à l'inverse d'autres matériaux, permet d'assurer un renouvellement permanent des ressources. Ces dernières sont abondantes et exploitables par l'homme.

4.8 Conclusion

Dans cette Section ont été cités de nombreux aspects qui ont orienté l'élaboration de ce projet. Le contexte actuel du terrain a tout d'abord été étudié afin de choisir une implantation favorable. Ensuite, de nombreuses normes et réglementations suite à la programmation ont dû être respectées et ont guidé le processus de conception du début ; à la fin. Le bureau d'architecture s'est également imposé un concept fort qui a dirigé notamment des choix tels que le volume, les revêtements de façade et la toiture du bâtiment. Afin d'obtenir des subsides, ce projet se doit d'utiliser au minimum 95% d'isolants biosourcés. Couplée entre autres avec la nécessité de limiter la surchauffe au sein du bâtiment, la problématique des isolants biosourcés a mené à un choix de type de parois. Pour terminer, les différents systèmes constructifs étudiés sont décrits.

5 Résultats

Dans cette Section sont développés les résultats de cette recherche. Tout d'abord, une comparaison des résultats du PRG du cas de base et des variantes est présentée en fonction de l'outil d'ACV utilisé. Cette analyse a pour objectif d'identifier l'outil le plus fiable afin d'étudier ces résultats plus précisément. Ces derniers sont ensuite analysés selon le type de parois et le système constructif. Vient ensuite la présentation des résultats de l'étude du coût. Ils sont également comparés en fonction du type de parois et du système constructif. Les résultats de l'ACV sont alors mis en parallèle avec ceux de l'étude du coût et enfin, sont comparés aux seuils imposés par le Guide RE2020 en France.

5.1 ACV en fonction du système constructif et de l'outil utilisé

Avant toute analyse, je rappelle que les FDES utilisées afin de réaliser l'ACV manuellement à l'aide de l'outil Excel sont exactement les mêmes que celles utilisées sur One Click LCA. Les émissions en kilogramme de dioxyde de carbone équivalent par unité fonctionnelle (kgCO₂eq/UF) pour chaque étape du cycle de chaque matériau sont donc identiques.

5.1.1 Analyse des résultats

La Figure 5.1 met en évidence les variations de résultats de l'ACV pour chaque système constructif étudié en fonction de l'outil utilisé. Ces résultats sont exprimés en kilos de dioxyde de carbone équivalents par m² de surface de plancher utile (kgCO₂eq/m²). Telle que définie dans la réglementation PEB, la surface de plancher utile (SPU) correspond à la somme des surfaces de planchers chauffés du bâtiment mesurées au nu extérieur des murs des façades (Guide Bâtiment Durable, 2020).

Les outils étudiés, tels que décrits dans les Sections 2 et 3, sont les suivants : One Click LCA, TOTEM et Excel. En fonction du système constructif étudié, la disparité des résultats est plus ou moins grande. De manière générale, selon la Figure 5.1, les résultats issus du logiciel Excel sont majoritairement les plus bas tandis que ceux provenant de l'outil TOTEM sont principalement les plus élevés. Pour rappel, cette recherche étudie un cas de base ainsi que quatre variantes. Leurs compositions de parois sont détaillées dans la Section 4. Les pourcentages présentés dans cette Section sont donnés par rapport aux émissions obtenues par l'outil One Click LCA. Ce dernier est considéré de manière arbitraire comme logiciel de référence dans cette analyse.

Tout d'abord, en ce qui concerne le cas de base, réalisé à partir d'une ossature traditionnelle, les émissions de CO₂eq au m² de SPU obtenues par le logiciel Excel sont très proches de celles obtenues par One Click LCA. Cette faible différence, inférieure à 1%, est considérée comme négligeable. Néanmoins, les résultats provenant du logiciel TOTEM sont remarquablement supérieurs.

Ensuite, pour le système constructif mixte mis en place par le bureau d'architecture Helium 3 et qui correspond à la variante une, on obtient de manière générale des émissions inférieures au cas de base. Cette différence d'émissions est significative via les outils TOTEM et Excel. Cependant, via l'outil One Click LCA, la différence de résultats entre ces deux premiers cas est inférieure à 10%. De plus, au sein même

de cette variante, les résultats diffèrent de manière remarquable entre les différents outils. Les résultats provenant d'Excel sont significativement inférieurs à ceux obtenus sur One Click LCA. Cette différence est égale à 11%.

Au niveau de la variante 2, comme précédemment, les résultats provenant de l'outil TOTEM sont nettement supérieurs. La variation des émissions entre l'ACV via One Click LCA et Excel est quant à elle négligeable puisqu'elle est inférieure à 10%. Toutefois, par rapport au cas de base, l'utilisation d'isolants biosourcés a des impacts sur les émissions relativement différentes en fonction de l'outil dont on se sert. En effet, l'emploi de ce type d'isolants par rapport à ceux du cas de base engendre une diminution des émissions de 2% et de 12% selon les outils One Click LCA et Excel. À l'inverse, les résultats provenant de TOTEM augmentent de près de 2%. Par conséquent, ces logiciels ne suivent pas la même tendance.

Concernant la variante trois, où l'ossature est réalisée à partir de panneaux de CLT, la variation des résultats obtenus sur One Click LCA et TOTEM est considérée comme négligeable. Celle entre One Click LCA et Excel est quant à elle remarquable puisque les émissions varient de près de 39%. Cette différence est assez surprenante vu que les FDES utilisées afin de réaliser l'ACV sur ces deux outils sont exactement les mêmes. On peut donc supposer que One Click LCA réalise des calculs en interne qui engendrent cette variabilité remarquable dans les résultats obtenus.

Enfin, l'ensemble des résultats de la variante 4, construite en ossature bois, tend à la positionner comme la moins émettrice, malgré le fait que la différence des émissions provenant de One Click LCA et Excel est significative. Les résultats issus de l'outil TOTEM sont de nouveau importants. En effet, il y a une variabilité de résultats égale à 21% entre ceux obtenus par One Click LCA et TOTEM.

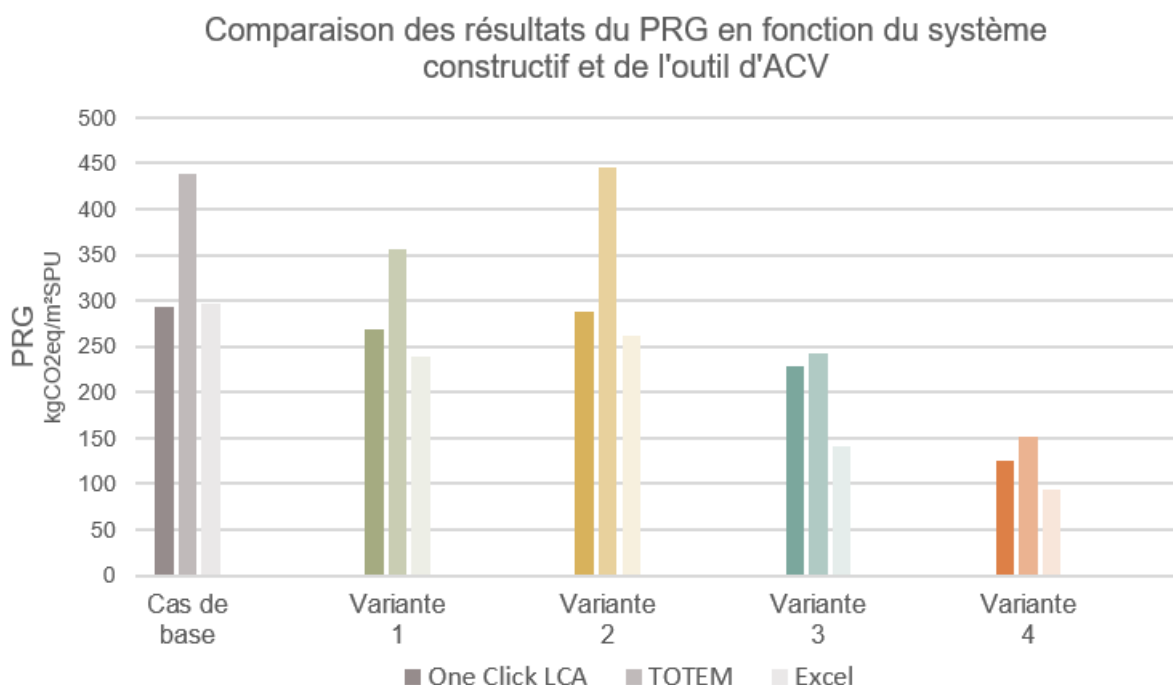


Figure 5.1- Comparaison des résultats du PRG en fonction du système constructif et de l'outil d'ACV (kgCO₂eq/m²SPU)

5.1.2 Potentielles causes de la variabilité des résultats

Cette variabilité de résultats provient de divers éléments. En effet, il existe différents paramètres qui influencent les résultats de l'ACV sur les outils One Click LCA, TOTEM et Excel. Certains d'entre eux vont être abordés dans cette Section. Néanmoins, au vu du manque de transparence de ces outils, beaucoup de calculs sont réalisés en interne et pas directement dévoilés aux utilisateurs.

5.1.2.1 *Durée de vie du bâtiment*

Le Guide RE2020 impose une durée de vie de référence de 50 ans. (Cabassud, 2020) Par conséquent, dans la Section 3, en accord avec cette réglementation française, la période d'étude pour l'ACV a été fixée à 50 ans. Cette période est encodée manuellement sur l'Outil One Click LCA.

Sur Excel, comme l'ACV se fait manuellement, les impacts de chaque matériau peuvent être adaptés à la durée de vie du bâtiment. En effet, chaque FDES mentionne des impacts propres à la durée de vie de référence du matériau. Ils doivent donc être multipliés afin de correspondre à la durée de vie du projet étudié.

À l'inverse, l'outil TOTEM impose une période de calcul de 60 ans. Ceci explique en partie la disparité des résultats entre TOTEM et les autres outils utilisés dans cette étude. Les émissions issues de ce logiciel sont plus importantes étant donné que la durée de vie du bâtiment plus longue. Néanmoins, par années, ces dernières sont plus faibles. Cette imposition engendre une difficulté de comparer les résultats issus de cet outil avec ceux d'autres logiciels, que ce soit Excel ou One Click LCA.

5.1.2.2 *Base de données*

Comme expliqué dans la Section 3, dans le cas de cette étude, les données utilisées pour réaliser l'ACV via One Click LCA et Excel proviennent des FDES issues de la base de données française, INIES. Une attention particulière a été portée sur le choix des FDES, afin que les valeurs initiales d'impacts environnementaux pour chaque étape du cycle de vie soient identiques pour la réalisation de l'ACV sur Excel ou sur One click LCA. Malgré cela, le PRG de certains matériaux est considérablement différent. Cette variabilité de résultat entre ces deux outils malgré la même base de données tend à faire penser que l'outil One Click LCA réalise des calculs en interne, dont l'utilisateur n'est pas informé.

La comparaison des émissions de CO₂eq de tous les matériaux se trouve en Annexe. Elle ne concerne que les outils One Click LCA et Excel, étant donné que le logiciel TOTEM ne fournit pas les résultats sous cette forme mais uniquement par type de parois ou pour la totalité du bâtiment.

En ce qui concerne l'outil TOTEM, comme expliqué dans la Section 3, ce dernier utilise la base de données belge B-EPD. Celle-ci regroupe une série de produits qui disposent d'une DEP réalisée en concordance avec le contexte belge. La conformité des DEP est vérifiée selon la norme CEN 15804. Cet outil utilise également des DEP génériques provenant de la base de données suisse, Ecoinvent 3.6. Ces données sont harmonisées au contexte belge (Trigaux & Lam, 2023).

5.1.2.3 Prise en compte de la localisation

Lors de l'ACV sur le logiciel One Click LCA, le calcul des émissions de CO₂eq de l'étape de fabrication tient compte d'un facteur de compensation local qui est déduit de l'impact initial fourni dans la FDES. Ce dernier est tributaire du profil énergétique de leur pays de fabrication. La méthode de compensation permet d'ajuster la production d'électricité au mix énergétique local du projet. En effet, pour chaque matériau utilisé dans le projet, les émissions engendrées par la consommation électrique nécessaire à sa fabrication et l'efficacité énergétique du pays sont ajustées à la localisation du projet (One Click LCA, s. d.).

Lors de l'ACV sur Excel, les impacts des matériaux liés au processus de fabrication fourni dans les FDES sont utilisés tels quels, sans compensation liée à la localisation du projet. Pour rappel, les FDES proviennent de la base de données française, INIES. Ces données sont donc adaptées à ce territoire.

Enfin, comme expliqué précédemment, l'outil TOTEM utilise depuis 2020 des données spécifiques issues de la base de données belge, B-EPD (déclaration environnementale de produit). Néanmoins, il continue d'utiliser des données génériques provenant de la base de données suisses Ecoinvent 3.6. Ces données sont adaptées au contexte belge en ce qui concerne les scénarios de transport induits par la structure du territoire et le mix énergétique utilisé en Belgique. Il faut préciser que chaque pays a un facteur d'émission spécifique en fonction de son mix énergétique. Les scénarios de fin de vie dépendent de la manière dont sont traités les déchets (Trigaux & Lam, 2023).

5.1.2.4 Scénarios de transports

Lors de l'encodage dans One Click LCA, ce dernier propose des valeurs de transport des matériaux depuis leur lieu de fabrication jusqu'au chantier ainsi que des moyens de transport par défaut. Ces valeurs varient en fonction de la région où se situe le projet (One Click LCA, s. d.). One Click LCA propose donc une série de régions qui couvrent un large territoire vu que la région concernée par ce projet est l'Europe. L'outil considère donc le même scénario de transport (distance et moyen) quel que soit le pays d'Europe dans lequel se trouve le projet.

Lors de l'encodage sur Excel, les émissions liées au transport sont calculées en fonction du scénario de transports qui se trouve dans la FDES. Ce dernier propose une distance entre la sortie de l'usine et le chantier et un moyen de transport par défaut. En fonction de ce scénario, les émissions liées au transport sont calculées et présentes dans la FDES. Étant donné que ces fiches proviennent de la base de données française INIES, ces scénarios sont adaptés à la France.

Enfin, comme expliqué précédemment, les données utilisées dans le logiciel TOTEM proviennent d'une base de données belge, B-EPD. L'ensemble des données que contiennent ces fiches est donc adapté au contexte belge. Quant aux données génériques provenant de la base de données INIES, elles ont été harmonisées afin de pouvoir être utilisées en Belgique.

5.1.2.5 Scénarios de fin de vie

Enfin, pour les scénarios de fin de vie, l'ACV sur One Click LCA propose des scénarios de marché réglables par l'utilisateur s'il le souhaite. Ceux-ci engendrent des émissions de CO₂ par défaut qui dépendent des pratiques standards sur le marché en fonction du type de matériaux et du pays dans lequel le projet est construit (One Click LCA, s. d.).

Comme précédemment, lors de l'ACV sur Excel, les émissions liées à la fin de vie des matériaux dépendent des scénarios proposés dans les FDES. Ces derniers correspondent donc aux pratiques standards françaises en fonction du type de matériau.

Enfin, sur TOTEM, une section « Fin de vie » permet de connaître les différents scénarios des matériaux qui composent les parois. Ces scénarios sont caractérisés en fonction du type de déchets et correspondent aux pratiques standards de construction en Belgique (Trigaux & Lam, 2023).

5.1.3 Résumé

Après cette analyse, dans la suite de cette recherche sont étudiés de façon plus précise les résultats provenant de l'outil One Click LCA. Ce choix se justifie par la transparence des données d'entrée utilisées. En effet, les FDES permettent d'avoir accès aux valeurs des impacts environnementaux considérés, tandis qu'avec TOTEM, seules quelques EPD sont disponibles étant donné que la base de données Ecoinvent nécessite une licence payante. Y avoir accès me semble être un point primordial dans la réalisation de l'ACV d'un bâtiment afin de pouvoir identifier quelle étape du cycle de vie pose un problème.




De plus, One Click LCA et Excel permettent de choisir la durée de vie du bâtiment tandis que TOTEM impose une durée de calcul de 60 ans.

Ensuite, le logiciel TOTEM ne fournit de résultats que pour le bâtiment dans sa totalité ou que pour un type de parois. À l'inverse, l'ACV sur Excel et One Click LCA propose des résultats également par matériaux étudiés.

Enfin, parmi les trois outils, One Click LCA est le seul qui adapte l'ensemble des scénarios par rapport à la localisation du projet. Néanmoins, toutes ces adaptations au contexte du projet nécessitent des calculs qui sont réalisés en interne. Il est impossible pour l'utilisateur de savoir comment ces données sont calculées. Le logiciel est considéré comme une « boîte noire ».

Le Tableau 5.1 résume les différences et similitudes que contiennent ces trois outils d'ACV.

Tableau 5.1 - Comparaison des logiciels d'ACV

			
Durée de vie de référence	Au choix (50 ans dans le cas de cette étude)	60 ans	Au choix (50 ans dans le cas de cette étude)
Base de données sources	INIES (français)	Ecoinvent (Suisse) B-EPD (belge)	INIES (français)
Base de données	FDES	EPD spécifiques provenant de B-EPD et EPD génériques provenant de Ecoinvent 3.6	FDES
Accessibilité des données	Oui à toutes les FDES	Uniquement aux EPD provenant de B-EPD	Oui à toutes les FDES
Prise en compte de la localisation	Oui par un facteur de compensation locale	Oui, harmonisation des données suisses au contexte belge	Non, mix énergétique du lieu de production
Scénarios de transports	Adapté à la région où se situe le projet	Oui, harmonisation des données suisses au contexte belge	Propre à la FDES, transports et distances propres à la structure de la France
Scénarios de fin de vie	Adapté au matériau et à la localisation du projet	Adapté au matériau et aux pratiques belges	Propre à la FDES, adapté à la France
Types de résultats	Émissions par matériau, type de paroi et pour la totalité du bâtiment	Émissions par type de paroi et pour la totalité du bâtiment	Émissions par matériau, type de paroi et pour la totalité du bâtiment

5.2 ACV en fonction du système constructif et du type de parois

Dans cette Section, les résultats de l'ACV réalisée sur One click LCA sont présentés en fonction du système constructif pour l'ensemble du bâtiment dans un premier temps, et par type de parois dans un second temps. Les résultats de la Figure 5.2 sont exprimés en kilo de dioxyde de carbone équivalent (kgCO₂eq) tandis que ceux de la Figure 5.3 sont exprimés en kilo de dioxyde de carbone équivalent par m² de surface de parois (kgCO₂eq/m²). Pour rappel, le Tableau 3.1 résume le système constructif des parois de chaque variante.

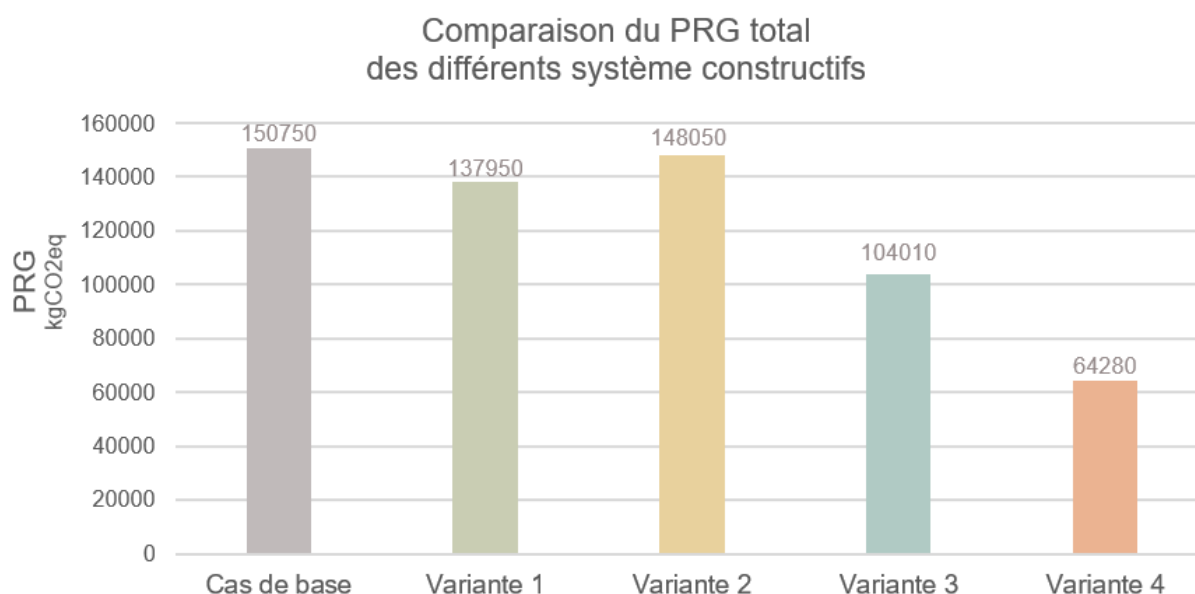


Figure 5.2 - Comparaison du PRG total des différents systèmes constructifs (kgCO₂eq)

Cette Figure montre que les émissions totales du bâtiment construit selon les différents systèmes constructifs étudiés. Tout d'abord, elle permet de remarquer que les systèmes constructifs en bois, qui correspondent aux variantes trois et quatre, sont les plus favorables. Par rapport à la construction traditionnelle du cas de base, ces deux variantes permettent de diminuer les émissions respectivement de 31% et 57%. La variante quatre permet de les réduire de plus de la moitié, ce qui est considéré comme remarquable.

Ensuite, on peut observer que le système traditionnel, qui correspond au cas de base, est le plus émissif. Néanmoins, ces émissions ne sont que très légèrement supérieures à celles de la variante deux, dont les isolants utilisés sont biosourcés. L'intérêt de la mise en place de ce type d'isolant soulève donc une question. L'analyse de la Figure 5.3 permet d'identifier certaines causes de cette faible différence.

Enfin, cette Figure permet de remarquer le faible impact des systèmes constructifs de la variante une, choisis par le bureau d'architecture Helium 3. Pour rappel, la dalle de sol et le plancher sur extérieurs sont réalisés respectivement en radier et hourdis avec l'utilisation d'isolants biosourcés, le liège pour le premier et la fibre de bois pour le second. Ensuite, la toiture terrasse est composée de hourdis et d'un isolant en polyuréthane. Pour ce qui est de la toiture inclinée et des murs extérieurs, ceux-ci sont réalisés en ossature bois.

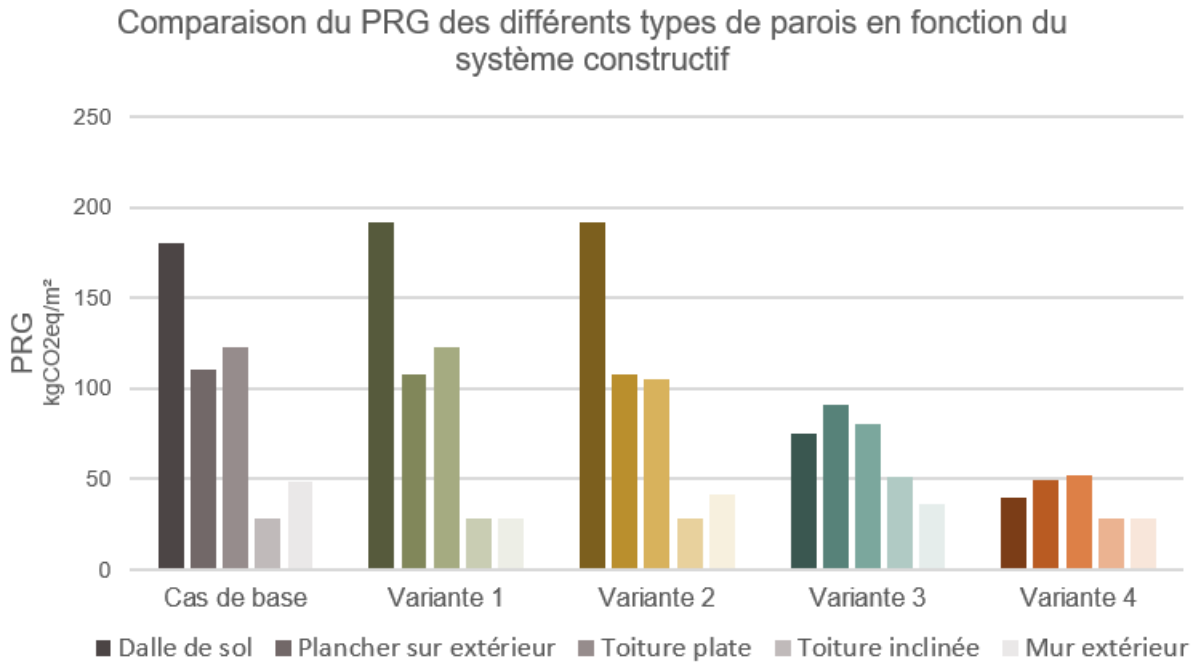


Figure 5.3 - Comparaison du PRG des différents types de parois en fonction du système constructif (kgCO₂eq/m²)

Cette Figure permet de comparer les émissions des différents types de parois selon leur système constructif. Elles sont exprimées en kilos de dioxyde de carbone équivalent par mètre carré de surface de parois (kgCO₂eq/m²). Comme expliqué à la Figure 5.2, la variante quatre est la moins émissive. À l'inverse, le cas de base possède le système constructif le plus émetteur.

De manière générale, la paroi qui a le plus d'impact sur le réchauffement climatique est la dalle de sol réalisée en béton. En effet, pour une même surface pour chaque paroi, la dalle de sol de la variante 2, réalisée à partir d'un radier et d'une isolation en liège, représente à elle seule près de 40% des émissions totales du bâtiment. Celle du cas de base, dont l'isolant est du polyuréthane, en représente 37%. Le choix de ce type de dalle de sol a dès lors un impact considérable sur les émissions totales du bâtiment. Néanmoins, plusieurs alternatives au béton sont possibles comme concevoir une dalle de sol en CLT ou en ossature bois. Les émissions de la dalle de sol en ossature bois valent près de 78% de moins que celles de la dalle de sol traditionnelle du cas de base. Cependant, ce système constructif nécessite la mise en place de pilotis, ce qui ne convient pas à toutes les situations.

Les émissions de la dalle de sol de la deuxième alternative sont étonnamment supérieures à celles de la première. En effet, la mise en place d'un isolant biosourcé laisse supposer qu'il engendre des émissions inférieures à un isolant classique tel que du polyuréthane par exemple. C'est d'ailleurs la supposition qu'a faite le bureau d'architecture Helium 3 en mettant un isolant en liège pour la dalle de sol. Pourtant, les résultats de la Figure 5.3 montrent le contraire. Ce phénomène s'explique par plusieurs raisons.

Tout d'abord, le logiciel One Click LCA ne dispose que de deux produits génériques et de deux produits spécifiques d'isolation en liège provenant chacun de la base de données INIES. Parmi les produits génériques proposés, les applications ne correspondent pas à celles du cas d'étude. Quant aux deux produits spécifiques, ils concernent un système d'isolation composé de fibres de bois et de liège expansé

nommé PAVAROOFF. À défaut d'autres données disponibles, ce système d'isolation a dû être utilisé malgré une application qui ne coïncide pas avec celle du cas d'étude. Selon les Annexes 10 et 11, les émissions engendrées par cette isolation sont de l'ordre de 58,68 kgCO₂eq/m². Ces dernières sont extrêmement élevées étant donné que selon l'Annexe 9, l'isolation de PUR de 12 cm d'épaisseur n'émet « que » 18 kgCO₂eq/m².

Toutefois, il faut savoir que Kenovel liège vient d'obtenir récemment le label produit biosourcé attribué aux isolants à partir de 70% de matières biosourcées or leur produit en compte 100%. Il figure donc comme le seul isolant 100% biosourcé sur le marché (Kenovel liège, s. d.) mais il ne dispose actuellement pas encore d'une DEP, ce qui explique son absence sur les logiciels d'ACV. Le certificat de cette labellisation se trouve en Annexe. On peut supposer que ce produit diminuerait les émissions de la variante deux par rapport à celles de la variante une.

De plus, selon la Figure 5.3, en opposition à la dalle de sol, les toitures inclinées et les murs extérieurs sont les parois les moins émissives. En effet, l'ensemble de ces deux parois ne représente que 16% de l'impact total sur le réchauffement climatique du cas de base. En ce qui concerne la variante une, leur influence est encore moindre étant donné que leurs émissions cumulées ne valent que 12% des émissions totales.

Pour ce qui est des murs extérieurs, ces derniers ont des émissions qui varient jusqu'à 43% entre ceux du cas de base en traditionnel et ceux de la variante 4 en ossature bois. Au vu du faible impact des murs sur les émissions totales, l'utilisation d'une ossature en bois afin de les réaliser dans la variante une n'a que de faibles impacts sur le résultat total des émissions du bâtiment.

Tableau 5.2 - Tableaux comparatifs du PRG (kgCO₂eq/m²) des variantes par rapport au cas de base

Potentiel de réchauffement global par mètre carré de parois selon le système constructif (kgCO ₂ eq/m ²)					
	Cas de base	Variante 1 - Mixte	Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Variante 3 - CLT	Variante 4 - Ossature bois
Dalle de sol	178,88	191,10	191,10	86,80	39,66
Plancher sur extérieur	110,48	107,60	107,60	103,65	49,71
Toiture plate terrasse	122,72	122,72	105,43	94,20	52,22
Toiture inclinée	28,36	28,36	28,36	62,09	28,36
Mur extérieur	47,98	27,75	41,04	36,18	27,75

■ Même ordre de grandeur ■ Significativement inférieur ■ Significativement supérieur

Le Tableau 5.2 met en avant le PRG ($\text{kgCO}_2\text{eq/m}^2$) pour chaque type de paroi et selon les différents systèmes constructifs. Le Tableau s'organise sous forme de hot spot afin de facilement identifier les variantes dont les émissions sont inférieures, supérieures ou dans le même ordre de grandeur que celles du cas de base. Ci-dessous sont détaillés les résultats significatifs des parois, représentés en vert et en rouge.

Comme mentionné précédemment, le système constructif en ossature bois est celui dont l'impact sur le réchauffement climatique est le moindre. Par rapport au système constructif traditionnel de la dalle de sol du cas de base dont les émissions valent $179 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$, celles de la dalle de sol en ossature bois de la variante quatre s'élèvent à seulement $40 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. Au niveau du plancher sur extérieur, on note une différence considérable. En effet, celui du cas de base émet $110 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ alors que celui en ossature bois n'émet que $50 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. Ensuite, concernant la toiture plate du cas de base, les émissions sont près de deux fois plus importantes que celles de la toiture plate de la variante quatre. En effet, cette dernière engendre des émissions égales à $52 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ alors que la toiture plate en hourdis et isolée avec du PIR émet près de $123 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. Que ce soit pour le cas de base ou la variante une, les toitures inclinées possèdent le même système constructif. Ces dernières sont réalisées en ossature bois et leurs émissions valent $28 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. Enfin, pour ce qui est des murs extérieurs, la différence d'émission est moins importante. Ceux en blocs de béton du cas de base émettent $48 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ tandis que ceux en ossature bois engendrent des émissions de $28 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$.

Ensuite, le système constructif en CLT propose aussi des parois dont les émissions sont significativement moindres que celles du cas d'étude. Ainsi, la dalle de sol en CLT de la variante trois permet de nettement diminuer l'impact sur le réchauffement climatique. Vu que ses émissions valent $87 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ alors que celles de la dalle de sol en radier et isolée en polyuréthane s'élèvent à $179 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. La toiture plate terrasse permet également de réduire les émissions de près de $28 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$. À l'inverse, la toiture inclinée émet $62 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ contre $28 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^2$ pour celle en ossature bois.

5.3 Étude du coût en fonction du système constructif et du type de parois

La Figure suivante présente le coût total du bâtiment en euros (€) selon les différents systèmes constructifs étudiés.

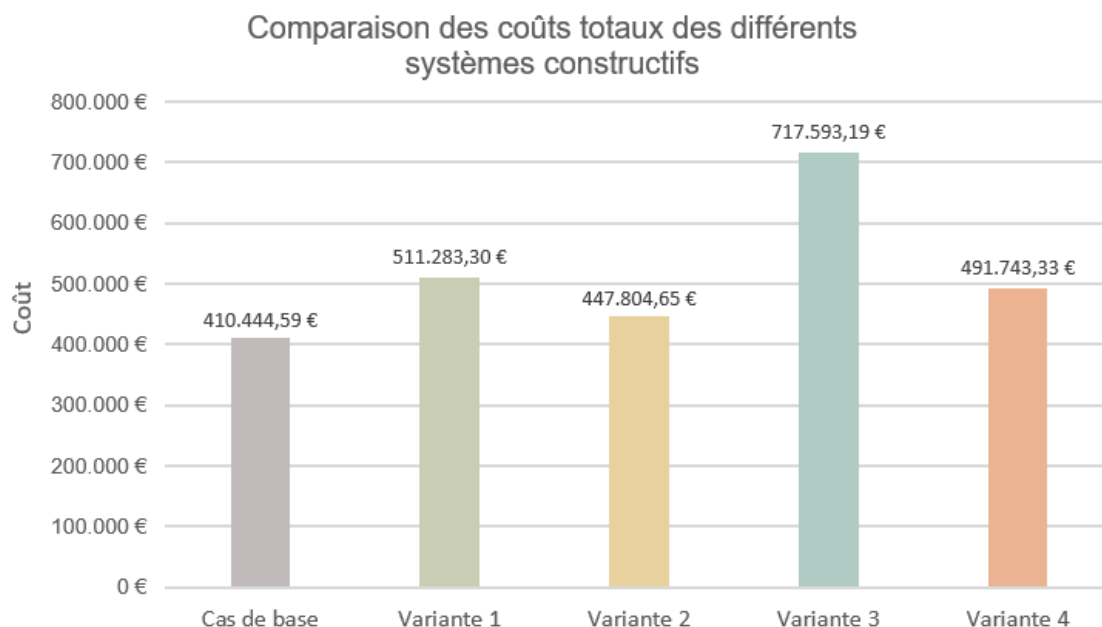


Figure 5.4 - Comparaison du coût total des différents systèmes constructifs (€)

Deux variantes se distinguent par leur faible impact économique : le cas de base et la variante deux. Néanmoins, le coût du bâtiment selon le système constructif traditionnel avec isolation biosourcée vaut 9% de plus que celui du cas de base avec une isolation classique en PUR. Ensuite, une autre variante, la trois, se démarque par son prix exceptionnellement élevé, réalisée à partir d'une ossature en CLT. Cette dernière a un coût 75% plus élevé que le cas de base. Enfin, celui de l'ossature bois est fort proche de la variante une qui présente le deuxième prix le plus important. La différence de coût entre ces deux alternatives est d'environ 4%.

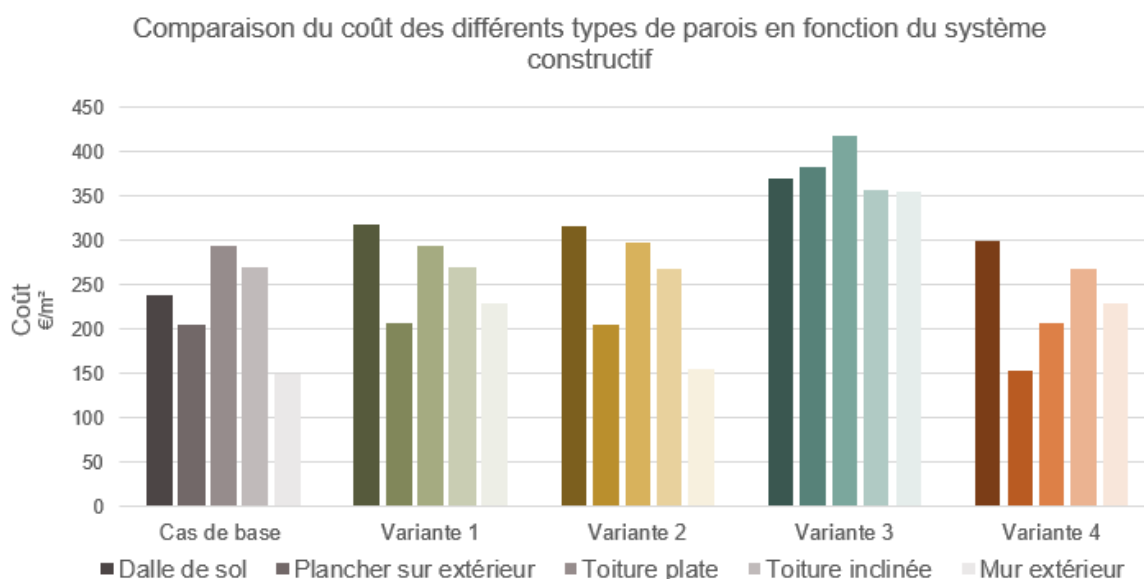


Figure 5.5 - Comparaison du coût des différents types de parois en fonction du système constructif (€/m²)

La Figure ci-dessus compare les résultats de l'étude du coût en fonction du système constructif et du type de parois. Les résultats sont exprimés en euros du mètre carré de parois (€/m²). Les valeurs chiffrées présentées ci-dessous sont issues du Tableau 5.3.

Tout d'abord, pour ce qui est du prix de la dalle de sol, la moins coûteuse est celle réalisée à partir d'un radier avec une isolation en polyuréthane, c'est-à-dire celle du cas de base. Son coût s'élève à près de 238 €/m². Ensuite, avec un montant de presque 300 €/m², celle sur pilotis en ossature bois de la variante 4 se place en seconde position. Elle est suivie de la dalle de sol traditionnelle isolée avec du liège dont le coût, légèrement supérieur, s'élève à 317 €/m². Ce système constructif correspond à celui de la variante une et deux. Enfin, la solution la plus onéreuse est la dalle de sol sur pilotis en CLT, dont le prix atteint plus de 370 €/m².

Ensuite, en ce qui concerne les planchers sur extérieur, avec un coût de 153 €/m², le système constructif en ossature bois est cette fois-ci le moins cher. Il est suivi par le plancher du cas de base dont le prix s'élève à 204 €/m². Pour rappel, ce plancher est composé de hourdis et d'une isolation en polyuréthane. Celui réalisé en hourdis avec une isolation en fibre de bois de la variante une et deux talonne le précédent avec un coût à peine plus élevé de 205 €/m². Enfin, le plancher sur extérieur en CLT a un coût de 383 €/m² qui est nettement plus élevé que celui des autres variantes.

Au niveau de la toiture plate terrasse, la tendance change. En effet, cette fois-ci c'est le système constructif en ossature bois qui possède le plus faible coût de 206 €/m². Avec un prix nettement plus élevé de 294 €/m², la toiture plate traditionnelle du cas de base et de la variante une se place en seconde position. Cette dernière est réalisée à partir de hourdis et isolée avec du PIR. Elle est suivie de près par la toiture plate traditionnelle isolée avec du polystyrène de la variante deux dont le prix est de 298 €/m². Enfin, comme précédemment, le système constructif le plus coûteux est le CLT. Dans le cas de la toiture plate, le coût s'élève à 418 €/m².

Concernant la toiture inclinée, seulement deux systèmes constructifs sont étudiés. Il y a tout d'abord celui en ossature bois qui se trouve dans le cas de base et les alternatives une, deux et quatre. Son coût s'élève à 268 €/m². Ensuite, il y a la toiture inclinée en CLT de la variante trois dont le coût de 356 €/m² est considérablement supérieur.

Enfin, pour ce qui est des murs extérieurs, ce sont les murs traditionnels en bloc de béton et isolés à l'aide de polyuréthane du cas de base qui sont les moins coûteux. Leur prix s'élève à 149 €/m². Les murs extérieurs de la variante deux, réalisés à partir de blocs de béton également mais cette fois avec une isolation en fibre de bois, valent 155 €/m². Avec un prix de 228 €/m², les murs extérieurs en ossature bois de la variante une et quatre se placent en troisième position. Enfin, les murs extérieurs en CLT de la variante trois dont le coût vaut 355 €/m² sont les plus chers.

Tableau 5.3 - Tableaux comparatifs du coût (€/m²) des variantes par rapport au cas de base

Coût par mètre carré de parois selon le système constructif (€/m ²)					
	Cas de base	Variante 1 - Mixte	Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Variante 3 - CLT	Variante 4 - Ossature bois
Dalle de sol	237,48	316,57	316,57	370,67	299,70
Plancher sur extérieur	203,91	205,00	205,00	383,29	152,86
Toiture plate terrasse	293,60	293,60	297,87	418,21	206,41
Toiture inclinée	267,97	267,97	267,97	356,47	267,97
Mur extérieur	149,34	228,38	154,60	354,69	228,38

■ Même ordre de grandeur

■ Significativement inférieur

■ Significativement supérieur

5.4 Mise en parallèle des résultats de l'ACV et de l'étude du coût

Dans cette Section, chaque diagramme de la Figure 5.6 représente un type de parois et met en parallèle les résultats obtenus lors de l'ACV et de l'étude du coût.

Tout d'abord (A), la dalle de sol produit des émissions de CO₂eq qui varient nettement plus que le coût. Celle dont le coût est le plus faible, c'est-à-dire celle du cas de base, correspond à une des plus émissives. Les émissions de la dalle de sol de la variante une et deux sont les plus élevées mais, comme expliqué précédemment, les émissions de l'isolant de cette paroi ne correspondent pas au produit voulu. Enfin, la variante 4 en ossature bois présente un faible impact sur le réchauffement climatique mais son coût est plus important que celui du cas de base. Les résultats de ce premier graphique permettent difficilement d'identifier le système constructif idéal pour la dalle de sol. Actuellement, l'élément qui peut le plus influencer le choix du système constructif est la possibilité ou non de la mise en place de pilotis. Si cela est possible, la variante quatre est la plus judicieuse. Sinon, une future analyse lorsque la DEP de l'isolant en liège KENOVEL sera disponible, serait extrêmement intéressante afin de pouvoir diminuer l'impact environnemental des variantes une et deux.

En ce qui concerne le second graphique (B), le plancher sur extérieur réalisé en ossature bois est la meilleure alternative, que ce soit d'un point de vue environnemental ou économique. Cette ossature est suivie par celle réalisée en béton. En effet, le plancher sur extérieur du cas de base est le deuxième moins cher mais produit des émissions près de deux fois plus conséquentes que l'ossature en bois. Les résultats des variantes une et deux coïncident presque avec ceux du cas de base. Ils ont un impact minime d'un point de vue environnemental. Ensuite, la variante trois a un coût près de deux fois plus important que celui des variantes une et deux et du cas de base. De plus, ses émissions sont à peine plus faibles que celles de ces dernières. D'un point de vue environnemental et économique, il n'y a donc aucun intérêt à mettre en place un plancher sur extérieur en CLT.

Le troisième graphique (C) compare les coûts et les émissions de CO₂eq/m² de la toiture plate. Cette fois-ci, le système constructif idéal est évident. En effet, la toiture plate en ossature bois présente des émissions et un coût nettement inférieur aux autres variantes. Néanmoins, si pour des raisons techniques ou d'inertie, la toiture plate doit être massive, la variante deux permet de diminuer les émissions en n'augmentant que de manière insignifiante le prix de la paroi par rapport à la variante une et au cas de base. Malgré des émissions plus faibles que les variantes une et deux, le CLT engendre un coût considérable, au moins deux fois plus élevé que celui en ossature bois.

Ensuite, au niveau de la toiture inclinée, seules deux options sont possibles (D). La toiture en ossature bois ou celle en CLT. Les résultats sont assez clairs. L'alternative en ossature bois est nettement moins émissive et présente un coût inférieur à celle en CLT. Ce type d'ossature est présent dans le cas de base ainsi que dans les variantes une, deux et quatre.

Le cinquième diagramme (E) présente la mise en parallèle des résultats obtenus pour les murs extérieurs. Le choix du cas de base permet de diminuer considérablement les coûts tout en augmentant de manière importante les émissions. À l'inverse, la variante 3 permet d'amoinrir l'impact environnemental tout en haussant nettement les dépenses. Les variantes une, quatre et deux sont des solutions intermédiaires. Notons que le coût des variantes une et quatre est 30% supérieur à celui de la variante deux.

Enfin, pour conclure, d'un point de vue environnemental, les parois de la variante quatre sont à chaque fois les moins émissives. D'un point de vue économique, le cas de base est le moins coûteux, sauf pour la toiture plate terrasse dont le coût en ossature bois est inférieur à celui du cas de base.

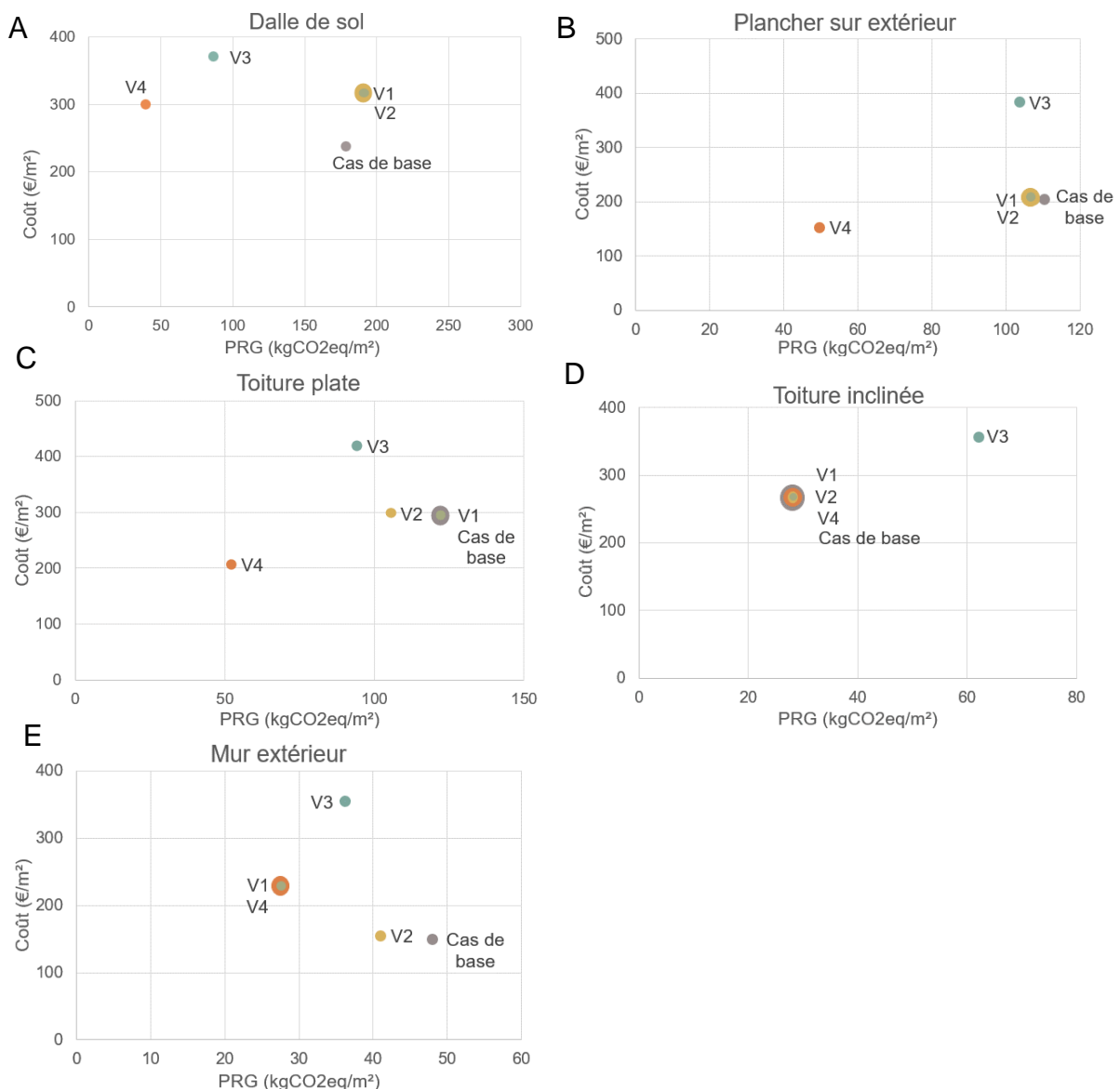


Figure 5.6 - Mise en parallèle des résultats du PRG (kgCO₂eq/m²) et des coûts (€/m²) en fonction du système constructif et du type de parois

La Figure 5.7 permet de comparer le rapport de grandeur des émissions et du coût de l'ensemble des parois étudiées et selon les différents systèmes constructifs.

En termes d'émissions, la dalle de sol possède le plus large éventail de résultats. En effet, celles des variantes une et deux valent près de quatre fois celles de la dalle de sol en ossature bois. Pour cette raison, c'est certainement d'un point de vue environnemental que le choix du système constructif de cette paroi doit être envisagé.

Ensuite, quelles que soient les dépenses engendrées par les murs extérieurs, leur impact sur le réchauffement climatique reste dans un même ordre de grandeur et globalement inférieur à celui des autres parois. Le choix du système constructif de cette paroi doit probablement se faire d'un point de vue économique et non pas environnemental.

En ce qui concerne les toitures inclinées, si ces dernières sont construites en ossature bois, elles engendrent des émissions faibles et un coût moyen. Cependant, si elles sont réalisées en CLT, les émissions sont moyennes et le coût est élevé.

Pour ce qui est du plancher sur extérieur, quel que soit le point de vue, les émissions et les coûts peuvent passer du simple au double. De manière générale, à l'exception du plancher sur extérieur en ossature bois, quel que soit le système constructif, leurs émissions sont relativement élevées.

Quant à la toiture plate, elle présente des résultats très équivoques étant donné que la variante quatre possède des résultats inférieurs d'un point de vue environnemental et économique à ceux des autres systèmes constructifs étudiés qui ont des coûts et émissions bien plus élevés.

Enfin, ce diagramme permet de confirmer que les dalles de sol en béton sont les plus émissives. Par la même occasion, il atteste du coût nettement plus élevé de l'ensemble des parois en CLT. Il permet également de clairement identifier le faible impact sur le réchauffement climatique de la variante quatre.

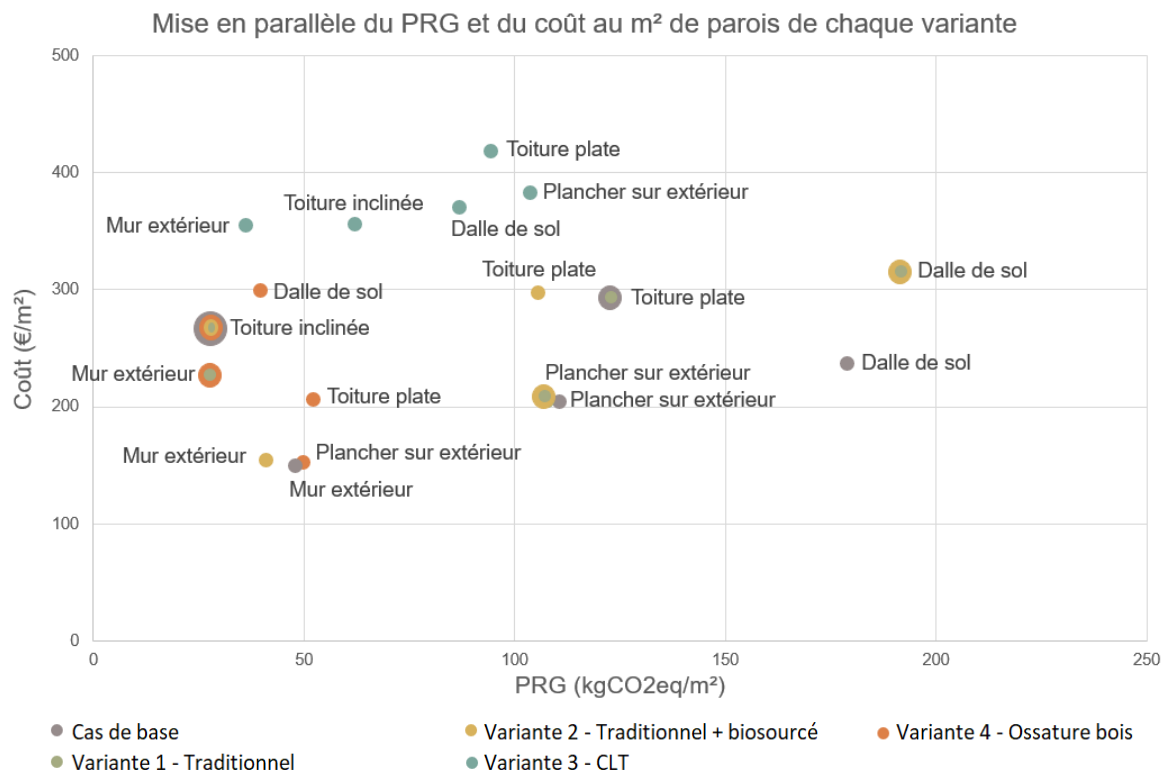


Figure 5.7 - Mise en parallèle des résultats du PRG (kgCO₂eq/m²) et des coûts (€/m²) en fonction du système constructif et du type de parois

5.5 Comparaison des résultats de l'ACV à la réglementation

Dans cette Section sont comparés les résultats aux seuils $I_{C,construction}$ imposés par le Guide RE2020 en France. Cet indicateur est défini dans la Section 2. Il s'exprime en $kgCO_2eq/m^2SPU$. En fonction de la destination des bâtiments, la valeur de ces seuils varie. Dans le cadre de cette étude, les résultats sont dans un premier temps comparés à ceux des bâtiments scolaires et dans un second temps, à ceux des maisons individuelles ou accolées.

D'après la Figure ci-dessous, dans un contexte français, dans le cas d'un bâtiment scolaire construit en ossature traditionnelle, les éléments étudiés dans cette recherche représentent 49% des émissions totales à ne pas dépasser d'ici à 2031. Les émissions de la variante une sont légèrement inférieures mais représentent tout de même 45% du seuil $I_{C,construction}$ à atteindre d'ici à 2031. La variante deux est presque similaire au cas de base. Ses émissions représentent déjà 48% de l'impact environnemental imposé. Enfin, les variantes trois et quatre qui contribuent le moins au PRG, n'ont émis que 34% du dioxyde de carbone équivalent admissible d'ici à 2023, contre 21% pour le système constructif en ossature bois.

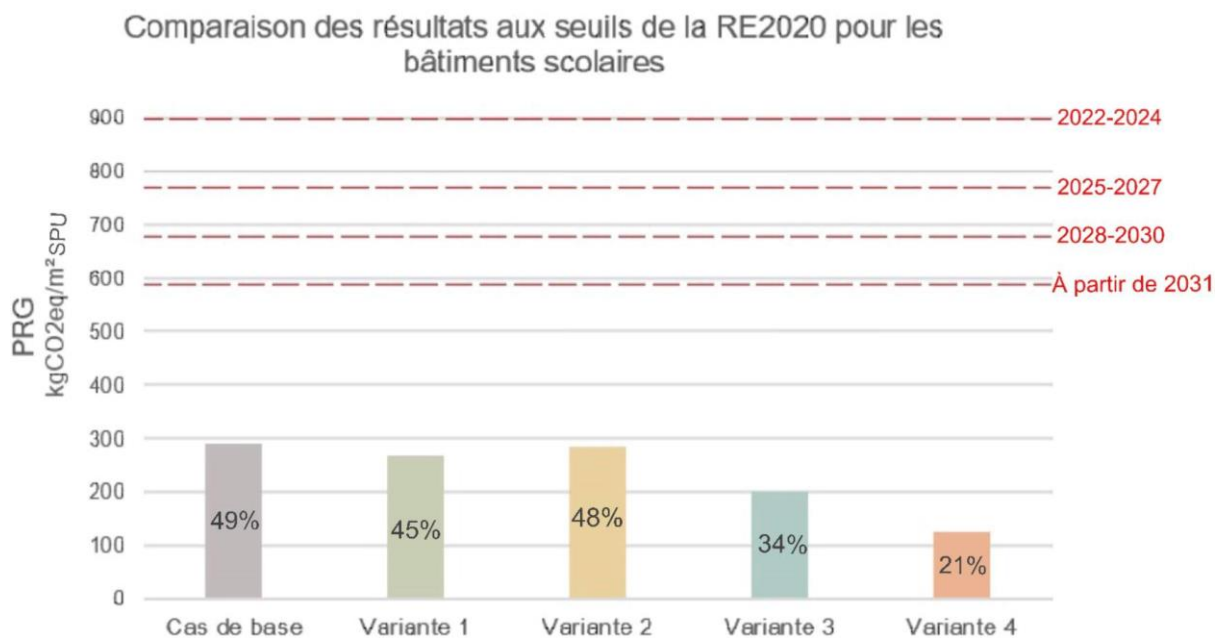


Figure 5.8 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020 pour les bâtiments scolaires

La Figure 5.9. met en évidence la part des émissions des différents systèmes constructifs de cette étude par rapport aux différents seuils imposés dans le Guide RE2020. Comme expliqué dans la Section 3, seule une partie de l'enveloppe est étudiée dans cette recherche, or les seuils $I_{c,construction}$ prennent en compte la totalité du bâtiment.

Dans le cas d'une maison individuelle ou accolée, les émissions du cas de base atteignent déjà 70% du seuil à ne pas dépasser d'ici à 2031, tandis que celles de la variante une en représentent 64%. Comme précédemment, les émissions de la variante deux ne sont que très légèrement plus faibles que la quantité de CO₂eq émis par le cas de base. Par conséquent, le dioxyde de carbone émis par les éléments étudiés dans cette recherche est à peine inférieur à 70%. Elle représente précisément 69% du seuil. Le PRG de l'ossature en CLT atteint quant à lui 48% des émissions totales à respecter, contre seulement 30% pour la variante quatre en ossature bois.

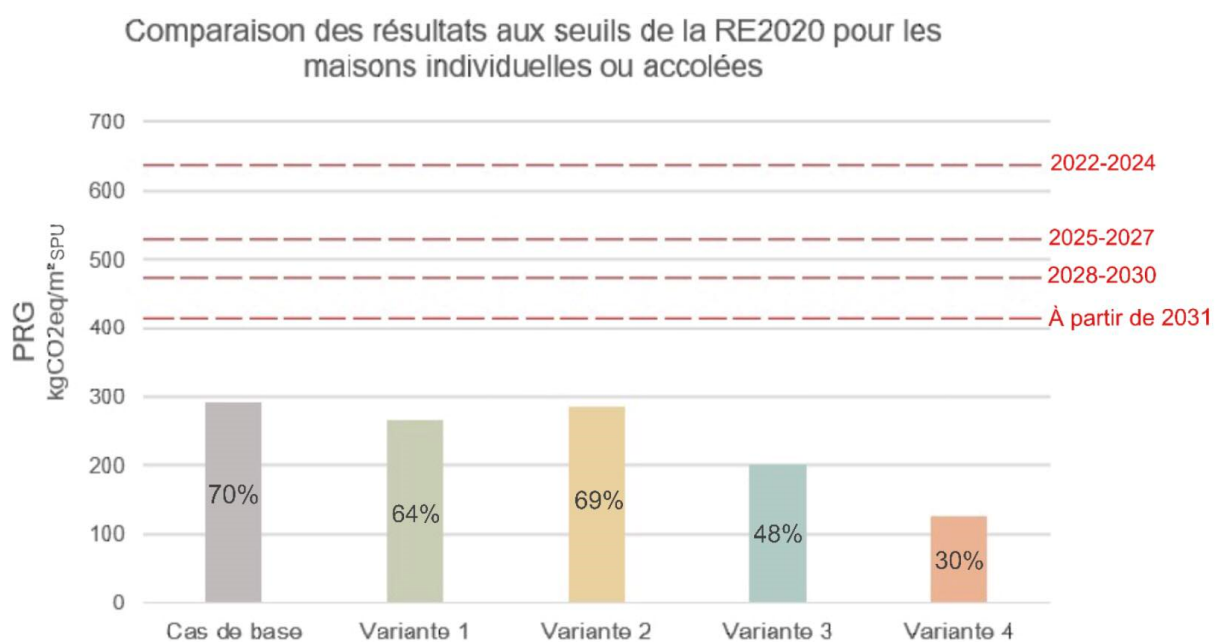


Figure 5.9 - Comparaison des résultats aux seuils de la RE2020 pour les maisons individuelles ou accolées

Actuellement, il est donc difficile de comparer les résultats de l'ACV aux seuils imposés dans le Guide RE2020. Il est compliqué d'évaluer la quantité de matière des éléments qui n'ont pas été pris en compte dans l'étude afin d'estimer leur part d'émissions par rapport au PRG de la totalité du bâtiment. Cependant, il est tout de même pertinent de s'apercevoir que les émissions de dioxyde de carbone calculées représentent déjà un certain pourcentage du seuil à atteindre d'ici à 2031.

6 Discussion

Dans cette Section, tout d'abord, les découvertes principales de cette recherche sont présentées. Elles sont suivies par une série de recommandations. Les forces et les faiblesses de ce travail sont ensuite énumérées avant que soient abordés les impacts pratiques. Enfin, cette Section se clôture par les travaux futurs.

6.1 Découvertes principales

Premièrement, selon le Tableau 5.2, d'un point de vue environnemental, quel que soit le type de parois, le système constructif en ossature bois est le moins émissif. Les matériaux réalisés à base de bois, comme le démontrent de nombreuses études dont celle réalisée par Sathre et Gustavsson (Sathre & Gustavsson, 2009), réduisent les émissions de CO₂. De plus, ce système constructif permet d'insuffler de la cellulose, dont les émissions sont inférieures à 2 kgCO₂eq/m².

Deuxièmement, selon le Tableau 5.3, d'un point de vue économique, un système constructif mixte alliant une toiture plate terrasse, un plancher sur extérieur et une toiture inclinée en ossature bois avec une dalle de sol et des murs extérieurs en traditionnel est le plus judicieux.

Troisièmement, quelle que soit la variante étudiée, les émissions des murs extérieurs et de la toiture inclinée sont inférieures à celles des autres parois. À surface égale, elles contribuent moins au réchauffement climatique. Ce phénomène est d'autant plus important si le système constructif est réalisé à partir de blocs de béton.

Quatrièmement, l'utilisation de trois outils d'ACV différents a permis de remarquer que, malgré les normes qui cadrent l'ACV, il n'existe pas une méthode unique afin de réaliser l'ACV d'un bâtiment. Il est difficile d'identifier les éléments qui contribuent à cette grande variation de résultats due au manque de transparence des outils utilisés.

Cinquièmement, lors de l'ACV sur One Click LCA et Excel, le PRG de certains matériaux est considérablement différent or les données environnementales utilisées sont identiques et proviennent de la même base de données. Cette variabilité de résultat entre ces deux outils tend à faire penser que l'outil One Click LCA réalise des calculs en interne, dont l'utilisateur n'est pas informé.

Sixièmement, l'analyse de l'étude du coût a permis de se rendre compte que le prix au mètre carré du plancher sur extérieur et de la toiture plate terrasse en ossature bois est inférieur à celui en traditionnel.

6.2 Recommandations

Cette Section présente les différentes recommandations pour le choix du système constructif des parois du bâtiment.

Premièrement, selon les valeurs issues du Tableau 5.2, d'un point de vue environnemental, les résultats montrent qu'il est conseillé de construire un bâtiment dont la totalité de l'enveloppe est réalisée en ossature bois. Les émissions de CO₂eq de l'ensemble des parois étudiées selon ce système constructif sont les plus faibles. En effet, ce système permet de réaliser des parois composées de caissons dans lesquels de la cellulose est insufflée. Selon l'Annexe 13, les émissions de cet isolant biosourcé sont inférieures à 2 kgCO₂eq/m².

Deuxièmement, selon les valeurs issues du Tableau 5.3, d'un point de vue économique, les résultats incitent à la construction d'un bâtiment traditionnel étudié comme cas de base, hormis la toiture plate terrasse dont le coût est inférieur en ossature bois. Néanmoins, comme expliqué dans la Section 2, dans un futur proche, la Belgique risque d'imposer des seuils de CO₂ à ne pas dépasser. La mise en place d'une taxe carbone rendra probablement ce système constructif moins avantageux économiquement qu'il ne l'est actuellement.

Troisièmement, il est recommandé aux concepteurs d'établir leur propre combinaison de systèmes constructifs pour les parois de l'enveloppe du bâtiment, en fonction des spécificités du projet qu'ils réalisent. La conception d'un projet est un processus multicritère qui fait naître des conflits entre les différentes thématiques. La nécessité de choisir des priorités est indispensable. En fonction de ces dernières, d'un point de vue de faisabilité, certains systèmes constructifs ne peuvent pas être envisagés. Le mix constructif idéal est donc à individualiser selon le projet.

Quatrièmement, selon la Figure 5.3, il est vivement conseillé de privilégier une dalle de sol en ossature bois ou en CLT sur pilotis. En effet, les dalles de sol réalisées en béton à partir d'un radier représentent à elles seules des émissions au moins quatre fois plus conséquentes que celles de la dalle de sol en ossature bois et émettent au moins deux fois plus de CO₂eq qu'une dalle de sol en CLT.

Dernièrement, suite à l'expérience issue de cette recherche, dans une future étude, je recommande la réalisation de l'ACV manuellement via un logiciel de type tableur. Je recommande également l'utilisation de la base de données Ecoinvent dans sa forme la plus récente afin d'en retirer les valeurs des indicateurs environnementaux nécessaires et adaptés au contexte étudié (Ecoinvent, 2023).

6.3 Forces

Ce travail présente différentes forces qui sont expliquées dans cette Section.

L'atout principal de cette recherche concerne l'approche comparative multicritère mise en place. Cette approche novatrice intègre l'aspect environnemental et économique ainsi que le système constructif. La mise en parallèle des émissions de CO₂eq et du coût permet au concepteur d'être capable d'identifier les conséquences du choix d'un système constructif parmi ceux les plus courants dans le domaine de la construction, d'un point de vue économique et environnemental. Dans la littérature, ces problématiques sont généralement étudiées indépendamment l'une de l'autre.

De plus, cette étude bénéficie d'une ACV réalisée à partir de trois outils différents. Un regard critique a dû être développé lors de la comparaison des résultats provenant de ces derniers. Cette triple analyse a permis d'identifier la fiabilité et les lacunes de chaque outil et de relever les différences drastiques entre ces logiciels qui peuvent mener à des variabilités de résultats conséquentes et mener à des conclusions qui divergent. Malgré les normes qui encadrent l'analyse de cycle de vie, cette étude a mis en évidence qu'il n'existe pas actuellement de méthode de calcul précise à suivre afin de mesurer les impacts d'un bâtiment sur le réchauffement climatique.

Une des plus-values de ce travail réside dans la comparaison des résultats par rapport aux seuils imposés dans le Guide RE2020 en France. Étant donné qu'en Belgique aucune réglementation sur le carbone n'existe, cette recherche a un aspect avant-gardiste. Elle suppose que dans un futur proche, la Belgique risque d'être soumise à des seuils limites de CO₂eq, d'où l'intérêt d'identifier les systèmes constructifs qui ne permettront pas de les respecter. Pour cette raison, les résultats obtenus ont été comparés aux seuils limites fixés en France afin de mettre en évidence les systèmes constructifs à éviter ou à adapter afin d'être prêt le jour où la réglementation belge verra le jour.

Ensuite, cette étude a permis d'énoncer des scénarios indicatifs. Ces derniers découlent d'analyses avancées et servent à guider les concepteurs en phase de « Concept Design ». Le processus de conception est complexe et nécessite la mise en place de priorités. Quelles que soient ces dernières, les résultats obtenus peuvent influencer les concepteurs de différentes manières et engendrer des scénarios différents, en lien avec les priorités préalablement établies. Par conséquent, cette recherche n'énonce pas une théorie figée mais possède une certaine flexibilité dans la lecture des résultats.

Enfin, cette recherche réalise l'ACV et l'étude du coût en phase de « Concept Design ». Effectuer cette étude tôt dans le processus de conception permet d'évaluer rapidement les impacts du projet du point de vue environnemental et économique et ainsi de guider les futurs choix tant qu'ils ne sont pas irréversibles. Le Guide RE2020 impose une évaluation des nouvelles constructions en phase de permis de construire et en phase d'achèvement des travaux (Cabassud, 2020). Cette étude permet donc d'anticiper ces évaluations afin de s'engager dans la bonne direction.

6.4 Faiblesses

Cette étude compte également certaines limites qui sont énumérées ci-dessous.

La première faiblesse concerne le choix des éléments analysés. Cette recherche se concentre uniquement sur l'enveloppe fermée du bâtiment. Seules la dalle de sol, le plancher sur extérieur, la toiture plate terrasse, la toiture inclinée et les murs extérieurs sont étudiés. Les revêtements de sol, de façade, de toiture ainsi que leurs systèmes d'accroche qui peuvent être communs à tous les systèmes constructifs, sont négligés. L'étude des parois intérieures et des éléments structuraux non compris dans l'enveloppe du bâtiment peuvent néanmoins influencer les résultats. Leur prise en compte aurait permis des résultats plus complets.

Ensuite, afin de réaliser l'ACV, il faut collecter les quantités de matériaux utilisés ainsi que sélectionner les FDES ou DEP. Tout d'abord, ces dernières sont limitées et tous les produits n'en disposent pas. En effet, selon Dsilva, la disponibilité et la quantité d'informations relatives aux impacts environnementaux des différentes phases est limitée (Dsilva et al., 2023). De plus, dans cette étude, les données environnementales utilisées proviennent de la base de données française INIES. Par conséquent, elles proviennent de scénarios français et ne correspondent donc pas au contexte belge. De nombreuses recherches prouvent pourtant la grande influence de celles-ci sur le réchauffement climatique.

La troisième faiblesse concerne l'outil One Click LCA. Même si ce dernier suit les normes EN 15978 et EN 15804 et malgré la volonté d'en faire un logiciel transparent, cet outil emploie sa propre méthode de calcul afin de réaliser l'ACV du bâtiment. Comme expliqué dans la Section 5, différents facteurs sont utilisés afin notamment d'harmoniser les données au contexte du projet et de tenir compte du mix énergétique du pays dans lequel il se situe. Les utilisateurs n'ont pas la main mise sur l'ensemble des procédés du logiciel qui est considérée comme une « boîte noire ».

Enfin, l'étude du coût est réalisée à partir d'offres de prix provenant de différents entrepreneurs. Les prix ont été communiqués par mètre carré, mètre cube ou unité et non selon les quantitatifs du cas d'étude. Par conséquent, les coûts ne tiennent pas compte du prix dégressif en fonction des quantités de matières nécessaires. De plus, ils ne sont valables que pour une courte durée et doivent dès lors être constamment réévalués afin d'être fiables et pertinents.

6.5 Impact pratique

En Belgique, avant de mettre en place une taxe carbone, il faut préparer le terrain d'un point de vue politique. Le gouvernement doit clairement identifier les objectifs de cette taxe afin que cette dernière soit élaborée de manière à pouvoir y répondre. De plus, afin de la rendre efficace, le gouvernement doit avoir une bonne connaissance et une compréhension de la structure économique des secteurs qui contribuent le plus au réchauffement climatique. Ensuite, étant donné que cette taxe varie selon la juridiction, la Banque mondiale et l'Organisation pour la coopération et le développement économiques ont élaboré ensemble des principes qui servent de point de départ à l'élaboration d'une taxe carbone réussie (Partenariat pour la préparation au marché, 2017).

De plus, la mise en place d'une telle taxe doit être communiquée suffisamment tôt afin que les secteurs concernés puissent s'y préparer. Actuellement, les bases de données belges disponibles, les outils et les expertises ne sont pas prêts à accueillir cette taxe. En effet, l'outil TOTEM belge qui permet de réaliser les ACV connaît de nombreuses lacunes qu'il faut étudier afin de continuer à investir dans cet outil. Dans le même ordre d'idée, la base de données belge B-EPD ne dispose que de très peu de DEP qui ne reflètent pas la grandeur du nombre de matériaux de construction disponibles. Ces données doivent être plus transparentes et plus fiables afin de limiter les grandes variances présentes entre certains produits de même type.

6.6 Travaux futurs

Afin d'approfondir la réflexion sur ces problématiques environnementales et économiques, différents travaux futurs peuvent être envisagés.

Tout d'abord, il serait intéressant de refaire l'étude de la dalle de sol isolée avec du liège des variantes une et deux. Comme expliqué dans la Section 5, le liège de la marque Kenovel a été récemment labellisé produit biosourcé et dispose d'une solution d'isolation pour dalle de sol. Néanmoins, la DEP de ce produit n'est actuellement pas disponible. Il serait donc judicieux d'attendre que cette dernière soit réalisée afin de réestimer les émissions de CO₂eq de cette paroi. Ainsi, elle pourrait être comparée avec plus de cohérence aux autres variantes et les scénarios pourraient être adaptés.

Ensuite, il serait intéressant d'étendre l'étude à la fin de la phase « Manufacturing et Construction » du plan de travail RIBA. Lors de cette étape, les éléments nécessaires à la construction du projet sont fabriqués et le bâtiment est construit afin qu'il puisse être mis en service à la fin de cette phase (RIBA, 2020). Cette seconde étude donnerait tout d'abord l'occasion d'étudier le bâtiment dans sa totalité en tenant compte des détails de construction et de la complexité d'assemblage. Les quantités de matériaux utilisés sur chantier pourraient provenir des sous-traitants et seront dès lors bien plus précises. De plus, actuellement, dans la Section 5, les résultats sont comparés au Guide RE2020 à titre indicatif étant donné que seule l'enveloppe est étudiée. Étendre l'étude à la totalité du bâtiment permettrait également de tenir compte de tous les éléments qui peuvent affecter le potentiel de réchauffement climatique. Les comparer à la norme à cette étape du processus est plus cohérent. Enfin, ce futur travail permettrait de vérifier l'influence des choix initiaux par rapport aux choix finaux d'un point de vue environnemental et économique.

Comme mentionné dans la Section 2, le choix des DEP et par conséquent des données environnementales qui en découlent impacte considérablement les résultats de l'ACV. Il serait donc judicieux d'étudier l'impact du choix de celles-ci sur les résultats finaux. Pour ce faire, il faudrait réaliser l'analyse du cycle de vie d'un même cas d'étude en utilisant tout d'abord uniquement des données génériques et ensuite exclusivement des données spécifiques. Cette étude pourrait se faire sur le cas d'étude de cette recherche lorsque l'ensemble des fabricants et produits seront connus. De cette manière, l'influence du choix des données d'entrée sur le potentiel de réchauffement global pourra être connu.

Enfin, il serait judicieux de refaire cette étude avec d'autres outils d'ACV reconnus tel que Pleiades par exemple. Ce dernier est un logiciel français payant créé par l'entreprise IZUBA Energies. Il permet notamment de réaliser des simulations thermiques et énergétiques dynamiques, de dimensionner des équipements et d'évaluer les impacts environnementaux des bâtiments. L'import de maquettes numériques est d'ailleurs rendu possible. La base de données utilisée afin de réaliser l'ACV du bâtiment est la base de données suisse Ecoinvent 2.2 (IZUBA énergies, s. d.). À titre informatif, la version actuelle de cette base de données est la 3.10. Pour terminer, selon la recherche de Malmedy C., il fait partie des outils les plus utilisés en Belgique (Malmedy, 2020).

7 Conclusions

Suite à l'Accord de Paris, des réglementations environnementales se développent dans certains pays. En Belgique, la réglementation PEB 2017 a cédé sa place à la réglementation Q-ZEN Cette dernière découle de la volonté de l'Union européenne de concevoir des bâtiments à quasi zéro énergie depuis 2021. Malgré les exigences qu'elle dicte, aucun seuil d'émissions de dioxyde de carbone équivalent n'est encore imposé dans notre pays. Néanmoins, afin de respecter son engagement auprès de l'Union européenne, tout laisse à penser qu'une évaluation de l'impact carbone risque d'être mise en place en Belgique dans un futur proche.

Dans la **littérature** scientifique, de nombreuses recherches évaluent les impacts environnementaux des matériaux de construction ou d'un cas d'étude dans sa totalité. L'analyse du cycle de vie (ACV) est la méthode d'évaluation des impacts environnementaux généralement utilisée dans ses études antérieures. Elle permet notamment d'évaluer le potentiel de réchauffement global (PRG) des matériaux de construction d'un bâtiment durant son cycle de vie. Néanmoins, une faible quantité d'entre elles évalue parallèlement les coûts de matériaux et de construction qu'engendre l'utilisation de matériaux durables afin de respecter les réglementations en vigueur.

Le **but de cette étude** est d'aider les parties prenantes d'un projet à s'adapter aux futures réglementations belges en termes d'impact carbone et de les conscientiser aux conséquences qu'elles ont au niveau économique. Pour cela, l'objectif est de quantifier l'impact environnemental et économique de cinq systèmes constructifs des parois de l'enveloppe d'un bâtiment en phase de « Concept Design ».

Dans un premier temps, que ce soit pour l'étude environnementale ou économique, un quantitatif des matériaux utilisés pour chacun des cinq systèmes constructifs étudiés doit être réalisé. Étant en phase de conception, ce dernier est réalisé à partir d'une maquette numérique 3D du volume du bâtiment et des surfaces de chaque paroi. L'ACV est ensuite réalisée à partir de trois outils différents : One Click LCA, TOTEM et Excel. Ces derniers sont ensuite évalués en termes de durée de vie du bâtiment étudié, des bases de données utilisées, de la prise en compte de la localisation, des scénarios de transport et des scénarios de fin de vie afin de conserver les résultats de celui qui correspond le plus au contexte belge.

Dans un second temps, les **résultats de l'ACV** issus de l'outil choisi précédemment sont analysés sous forme de deux graphiques. Les impacts environnementaux des systèmes constructifs étudiés sont évalués par rapport à ceux du cas de base, qui constitue celui le plus classique et le plus courant. Ils permettent tous deux de répondre à la première sous-question de recherche intitulée : « Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue environnemental ? » Ces résultats sont synthétisés dans un Tableau sous forme de hot spot.

- L'analyse du premier graphique permet d'identifier le système constructif dont les émissions de CO₂eq sont les moindres au niveau du bâtiment dans sa totalité. Le système constructif en ossature bois permet de diminuer les émissions de CO₂eq de 57% par rapport à un bâtiment construit en traditionnel.

- Le second graphique permet de comparer les parois entre elles. Même prises individuellement, toutes les parois de l'enveloppe du bâtiment en ossature bois présentent les émissions les plus faibles. D'un point de vue environnemental, le système constructif à ossature en bois est indéniablement le meilleur.

Dans un troisième temps, les **résultats de l'analyse de coût** sont également analysés sous forme de deux graphiques. Les coûts des systèmes constructifs étudiés sont évalués par rapport à ceux du cas de base, qui constitue celui le plus classique et le plus courant. Ils permettent tous deux de répondre à la seconde sous question de recherche intitulée :

« Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue économique ? ». Ces résultats sont synthétisés dans un Tableau sous forme de hot spot.

- L'analyse du premier graphique permet d'identifier le système constructif dont les coûts sont les moindres au niveau du bâtiment dans sa totalité. Le système constructif traditionnel du cas de base possède le coût le plus avantageux. Il permet notamment de diminuer les frais de 9% à 75% par rapport aux autres alternatives étudiées.
- Le second graphique permet de comparer les parois entre elles. Cette analyse permet d'identifier que l'ensemble des parois de l'enveloppe selon le système constructif traditionnel ne possède pas le coût le moindre. En effet, le plancher sur extérieur et la toiture plate terrasse engendrent des frais inférieurs. Dans ce cas, une solution de système constructif mixte alliant traditionnel et ossature bois est le plus avantageux d'un point de vue économique.

Dans un quatrième temps, les **résultats** des deux analyses sont **mis en parallèle** dans différents graphiques représentant chacun un type de parois. Ils permettent ainsi de répondre à la question de recherche principale en permettant de faciliter la comparaison des différentes techniques de constructions étudiées au stade « Concept Design » d'un point de vue environnemental et économique pour les architectes soucieux de l'intégration environnementale.

Dans un dernier temps, les résultats de l'ACV sont comparés à la réglementation RE2020 en vigueur en France. Étant donné que les ACV sont réalisées uniquement pour l'enveloppe du bâtiment, la comparaison de leur impact carbone par rapport aux seuils imposés est inexacte. Néanmoins, cela permet d'identifier que dans le cas de maisons individuelles ou accolées, le système constructif traditionnel de l'enveloppe représente déjà 70% des émissions de dioxyde de carbone équivalent tolérées d'ici à 2031. Quant au système constructif à ossature bois, il n'en représente que 30%.

L'ensemble de ces résultats a mené à une série de recommandations adressées à toutes les parties qui interviennent dans la conception d'un projet. Elles concernent le choix d'un ou plusieurs systèmes constructifs si la priorité est portée sur l'impact environnemental ou économique. À partir des résultats des analyses mises en parallèle, elles incitent également les intervenants à faire leur propre scénario en

fonction des priorités de leur projet. Enfin, elles insistent sur la proportion des émissions liées à la dalle de sol en béton par rapport aux émissions totales. Par conséquent, elles insistent sur le choix du système constructif de cette paroi en particulier.

Dans un **futur proche**, de nombreuses études portant sur l'impact environnemental combiné à l'impact économique risquent de voir le jour. En effet, la Belgique est susceptible d'être contrainte très prochainement à des réglementations en ce qui concerne l'empreinte carbone des bâtiments. Cela va faire naître de nouvelles attentes en ce qui concerne les outils d'ACV et les bases de données disponibles sur le marché belge auquel il faudra être capable de répondre.

8 Références

- ABEX. (2023). *Bordereau des prix unitaires 2023*. Association Belge des Experts. Bruxelles, Belgique.
- Alshamrani, O. S. (2016). Life cycle assessment of low-rise office building with different structure–envelope configurations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(3), 193-200. <https://doi.org/10.1139/cjce-2015-0431>
- Anand, C. K., & Amor, B. (2017). Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings : A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 408-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>
- Apostolopoulos, V., Mamounakis, I., Seitaridis, A., Tagkoulis, N., Kourkoumpas, D.-S., Iliadis, P., Angelakoglou, K., & Nikolopoulos, N. (2023). An integrated life cycle assessment and life cycle costing approach towards sustainable building renovation via a dynamic online tool. *Applied Energy*, 334, 120710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710>
- Attia, S. (2018). Chapter 6—Materials and Environmental Impact Assessment. In S. Attia (Éd.), *Net Zero Energy Buildings (NZEB)* (p. 155-187). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812461-1.00006-X>
- Attia, S., Santos, M. C., Al-Obaidy, M., & Baskar, M. (2021). Leadership of EU member States in building carbon footprint regulations and their role in promoting circular building design. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 855(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/855/1/012023>
- Azzouz, A., Borchers, M., Moreira, J., & Mavrogianni, A. (2017). Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design : A case study in London, UK. *Energy and Buildings*, 139, 547-568. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.089>
- Balasbaneh, A. T., & Bin Marsono, A. K. (2017). Strategies for reducing greenhouse gas emissions from residential sector by proposing new building structures in hot and humid climatic conditions. *Building and Environment*, 124, 357-368. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.025>
- Blondeau-Patissier, R. (2015). *Construire en CLT : Caractéristiques, comportements et mise en œuvre du bois massif lamellé-croisé*. éd. le Moniteur; France, Paris.
- Bodmer, M. (2020). *Analyse du cycle de vie et coût du cycle de vie dans la rénovation des logements en Belgique—Analyse comparative de différents matériaux et techniques*.

Travail de fin d'étude. Liège, Belgique.
<https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10728>

- Bruce-Hyrkäs, T., Pasanen, P., & Castro, R. (2018). Overview of Whole Building Life-Cycle Assessment for Green Building Certification and Ecodesign through Industry Surveys and Interviews. *Procedia CIRP*, 69, 178-183.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.127>
- Bureau d'architecture Helium 3. (2022). *Présentation du projet de la Crèche de Beaufays*. Liège, Belgique.
- Bureau d'architecture Helium 3. (2023a). *Demande de permis d'urbanisme pour la crèche de Beaufays—Annexe 4*. Liège, Belgique.
- Bureau d'architecture Hélium 3. (2023b). *Echanges durant un stage*. Liège, Belgique.
- Cabassud, N. (2020). *Guide RE2020 Règlementation environnementale*. Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) Méditerranée. Lyon, France.
- Castagné, E. (2023). *Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse du Cycle de Vie en phase conception : influence de l'estimation des quantités sur la précision du calcul*. Liège, Belgique. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/17404>
- CCNUCC. (s. d.). *L'Accord de Paris—Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques*. Bonn, Cologne. Consulté le 11 décembre 2023 à l'adresse : <https://unfccc.int/fr/a-propos-des-ndcs/l-accord-de-paris>.
- CEN. (2012). *NBN CEN 15978 -Contribution des ouvrages de construction au développement durable—Evaluation de la performance environnementale des bâtiments—Méthode de calcul*. Comité Européen de Normalisation. Bruxelles, Belgique.
- CEN. (2021). *NBN CEN 15804:2012+A2:2019/AC - Contribution des ouvrages de construction au développement durable—Déclaratios environnementales sur les produits—Règles régissant les catégories de produits de construction*. Comité Européen de Normalisation. Bruxelles, Belgique.
- Chen, L., Huang, L., Hua, J., Chen, Z., Wei, L., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., Dong, L., & Yap, P.-S. (2023). Green construction for low-carbon cities : A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1627-1657. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01544-4>

- Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society : A review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(4), 2277-2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
- Climat.be*. (2023). Le site fédéral belge pour une information fiable sur les changements climatiques. Bruxelles, Belgique. Consulté le 29 juin 2023 à l'adresse : <https://climat.be>.
- Climate Watch. (2022). *Belgium Climate Change Data*. World Resources Institute. Washington DC, USA. Consulté le 29 septembre 2023 à l'adresse : <https://www.climatewatchdata.org/>.
- Commissariat général au développement durable. (2019). *Qu'est-ce qu'un gaz à effet de serre ?* Consulté le 12 décembre 2023 à l'adresse : <http://www.notre-environnement.gouv.fr/rapport-sur-l-etat-de-l-environnement/themes-ree/defis-environnementaux/changement-climatique/comprendre-le-changement-climatique/article/qu-est-ce-qu-un-gaz-a-effet-de-serre>.
- Corradi, O. (2022). *Tomorrow—A Pragmatic Guide to Climate Change*. Consulté Le 29 Septembre 2023 à l'adresse : <https://www.Tmrow.Com/Climatechange/>.
- Demesmaecker, P. (2019). *Q-ZEN, des bâtiments Quasi Zéro Energie. Comprendre l'exigence Q-ZEN et évaluer son impact sur la conception des bâtiments*.
- Di Maria, A., Eyckmans, J., & Van Acker, K. (2020). 26—Use of LCA and LCC to help decision-making between downcycling versus recycling of construction and demolition waste. In F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, F. Colangelo, R. Tuladhar, & A. Koutamanis (Éds.), *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling* (p. 537-558). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819055-5.00026-7>
- Dsilva, J., Zarmukhambetova, S., & Locke, J. (2023). Assessment of building materials in the construction sector : A case study using life cycle assessment approach to achieve the circular economy. *Heliyon*, 9(10), e20404. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20404>
- ECEEE. (2020). *EU Parliament votes in favour of cutting emissions 60% by 2030*. European Council for an Energy Efficient Economy. Consulté le 19 décembre à l'adresse : <https://www.ecee.org/all-news/news/news-2020/eu-parliament-votes-in-favour-of-cutting-emissions-60-by-2030/>.
- Ecoinvent. (2023). Consulté en ligne le 18 novembre à l'adresse : <https://ecoinvent.org/>

- Flager, F., Basbagill, J., Lepech, M., & Fischer, M. (2012). *Multi-objective building envelope optimization for life-cycle cost and global warming potential—ULiège Library*. <https://doi.org/DOI:10.1201/b12516-32>
- GIEC. (2023). *Rapport de synthèse* (Le sixième rapport d'évaluation du GIEC 2023). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Bruxelles, Belgique.
- Guardigli, L. (2014). 17—Comparing the environmental impact of reinforced concrete and wooden structures. In F. Pacheco-Torgal, L. F. Cabeza, J. Labrincha, & A. de Magalhães (Éds.), *Eco-efficient Construction and Building Materials* (p. 407-433). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.3.407>
- Guide Bâtiment Durable. (2020). *Les déclarations environnementales de produits (EPD)*. Consulté en ligne le 22 novembre à l'adresse : <https://www.guidebatimentdurable.brussels/declarations-environnementales-produits-epd>
- Hoogmartens, R., Van Passel, S., Van Acker, K., & Dubois, M. (2014). Bridging the gap between LCA, LCC and CBA as sustainability assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 48, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.05.001>
- INIES. (s. d.). Consulté le 10 décembre à l'adresse : <https://www.inies.fr/>.
- ISO. (2020a). *International Standard ISO 14040:2006/A1. Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. International Standardization Organization. Genève, Suisse.
- ISO. (2020b). *International Standard ISO 14044:2006/A2. Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. International Standardization Organization. Genève, Suisse.
- IZUBA énergies. (s. d.). *Documentation du logiciel Pleiades*. Consulté le 4 décembre 2023 à l'adresse : <https://pleiades-doc.com/v4/fr/index.php/Accueil>
- Kenovel liège. (s. d.). *Isolant acoustique et phonique en liège expansé avec le label biosourcé*. Wavre, Belgique. Consulté le 27 novembre 2024 à l'adresse : <http://kenovel-liege.be/>.
- Khasreen, M. M., Banfill, P. F. G., & Menzies, G. F. (2009). Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. *Sustainability*, 1(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su1030674>
- Lara Allende, A., & Stephan, A. (2022). Life cycle embodied, operational and mobility-related energy and greenhouse gas emissions analysis of a green development in

- Melbourne, Australia. *Applied Energy*, 305, 117886.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117886>
- Le Den, X., Caspani, M., Steinmann, J., Ryberg, M., & Lauridsen, K. (2023). *A 1.5°C Pathway for the Global Buildings Sector's Embodied Emissions—Pathway Development Description*.
- Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne. (2010). *Directive 2010/31/UE du Parlement européen et du Conseil sur la performance énergétique des bâtiments (refonte)*. *Journal officiel de l'Union européenne*. Bruxelles, Belgique.
- Liang, Y., Li, C., Liu, Z., Wang, X., Zeng, F., Yuan, X., & Pan, Y. (2023). Decarbonization potentials of the embodied energy use and operational process in buildings : A review from the life-cycle perspective. *Heliyon*, 9(10), e20190.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20190>
- Malmedy, C. (2020). *Travail de Fin d'Etudes : Analyse des impacts environnementaux et calcul du coût environnemental d'un immeuble à appartements sur l'ensemble de son cycle de vie pour atteindre les objectifs quasi zéro énergie et net zéro énergie*. Liège, Belgique.
- Ministère Écologie Énergie Territoires. (2022). *Décryptage des COP : Les conférences internationales de lutte contre le dérèglement climatique*. Consulté le 11 décembre 2023 à l'adresse : <https://www.ecologie.gouv.fr/decryptage-des-cop-conferences-internationales-lutte-contre-dereglement-climatique>.
- Motuzienė, V., Rogoža, A., Lapinskienė, V., & Vilutienė, T. (2016). Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis : A case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 532-541.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.103>
- Nässén, J., Hedenus, F., Karlsson, S., & Holmberg, J. (2012). Concrete vs. Wood in buildings – An energy system approach. *Building and Environment*, 51, 361-369.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.011>
- One Click LCA. (s. d.). *Help Center*. Consulté le 9 novembre 2023 à l'adresse : <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us>.
- Partenariat pour la préparation au marché. (2017). *Guide sur la taxation carbone : Un manuel pour les décideurs politiques*. Washington DC, Etats-Unis.
- Plati, C., & Tsakoumaki, M. (2023). Life Cycle Assessment (LCA) of Alternative Pavement Rehabilitation Solutions : A Case Study. *Sustainability*, 15(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3390/su15032129>

- PNUD. (2023). *Objectifs de développement durable*. Programme des Nations Unies pour le développement. Consulté le 18 septembre 2023 à l'adresse : <https://www.undp.org/fr/sustainable-development-goals>.
- Reddy, V. R., Kurian, M., & Ardakanian, R. (2015). *Life-cycle Cost Approach for Management of Environmental Resources : A Primer*. Consulté le 12 novembre 2023 à l'adresse : <https://collections.unu.edu/view/UNU:2685#relatedLinks>
- RIBA. (2020). *RIBA Plan of Work 2020*. Royal Institute of British Architects. Londres, Angleterre.
- Ritchie, H. (2020). Sector by sector : Where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*. Oxford, Angleterre. Consulté le 3 septembre 2023 à l'adresse : <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>.
- Sandanayake, M., Lokuge, W., Zhang, G., Setunge, S., & Thushar, Q. (2018). Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction—A scenario based comparative case study. *Sustainable Cities and Society*, 38, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.017>
- Sathre, R., & Gustavsson, L. (2009). Using wood products to mitigate climate change : External costs and structural change. *Applied Energy*, 86(2), 251-257. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.007>
- Service Public Fédéral (SPF). (2022). *Le programme EPD belge « B-EPD »*. Santé publique, Sécurité de la Chaîne alimentaire et Environnement. Consulté en ligne à l'adresse : <https://www.health.belgium.be/fr/le-programme-epd-belge-b-epd>.
- SPW. (2021). *Le Guide PEB 2021*. Namur, Belgique.
- TOTEM. (s. d.). Consulté le 12 novembre à l'adresse : <https://www.totem-building.be/>.
- Trigaux, D., & Lam, W. C. (2023). *Environmental profile of buildings*. TOTEM. Belgique.
- UPA. (2020). *Bordereau des prix unitaires 2020*. Union Professionnelle des Architectes. Bruxelles, Belgique.
- Vasishta, T., Hashem Mehany, M., & Killingsworth, J. (2023). Comparative life cycle assesment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of precast and cast-in-place buildings in United States. *Journal of Building Engineering*, 67, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105921>
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., Yin, Z., Huang, L., Fu, Y., Li, L., Chang, S. X., Zhang, L., Rinklebe, J., Yuan, Z., Zhu, Q., Xiang, L., Tsang, D. C. W., Xu, L., Jiang, X., ... Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for

- achieving carbon neutrality. *The Innovation*, 2(4), 100180. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>
- Weidema, B. P., & Wesnæs, M. S. (1996). Data quality management for life cycle inventories—An example of using data quality indicators. *Journal of Cleaner Production*, 4(3), 167-174. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(96\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(96)00043-1)
- Zhang, X., & Wang, F. (2017). Analysis of embodied carbon in the building life cycle considering the temporal perspectives of emissions : A case study in China. *Energy and Buildings*, 155, 404-413. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.049>
- Zimmermann, R. K., Kanafani, K., Rasmussen, F. N., & Birgisdóttir, H. (2019). Early Design Stage Building LCA using the LCAByg tool : Comparing Cases for Early Stage and Detailed LCA Approaches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323(1), 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012118>

9 Annexes

9.1 Annexe 1 : Compositions de parois du cas de base

Tableau 9.1 - Composition des parois du cas de base

Cas de base				
Type de parois	Numérotation	Matériau	Epaisseur (cm)	Epaisseur totale (cm)
Dalle de sol	0	Revêtement de sol intérieur	-	78
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Isolation thermique PUR	12	
	4	Préchape	8	
	5	Radier	25	
	6	Membrane PE	-	
	7	Sable stabilisé	5	
	8	Empierrement	20	
	9	Géotextile	-	
Plancher sur extérieur	0	Revêtement de sol intérieur	-	47
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Membrane Insulit	1	
	4	Préchape technique	5	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	18	
	7	Isolation thermique en panneaux PUR	10	
	8	Enduit extérieur	-	
Toiture terrasse	0	Revêtement de sol extérieur	-	43
	1	Membrane d'étanchéité TPO	-	
	2	Isolation thermique en PIR	15	
	3	Chape de pente	8	
	4	Membrane pare-vapeur	-	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	15	
	7	Plafonnage	-	
Toiture inclinée	0	Revêtement de toiture	-	65,75
	1	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	
	2a	Charpente en bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	23	
	3	Membrane pare vapeur	-	
	4	Plaque de plâtre	1,25	
	5	Plaque de plâtre	1,25	
	6	Lattage	6	
	7a	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	
	7b	Plaque de plâtre	1,25	
Mur extérieur	0	Revêtement de façade	-	33
	1	Pare-pluie	-	
	2	Isolation thermique en PUR	14	
	3	Blocs béton	19	
	4	Plafonnage	-	

9.2 Annexe 2 : Compositions de parois de la variante 1 – Mixte

Tableau 9.2 - Composition des parois de la variante 1 - Mixte

Variante 1 - Mix				
Type de parois	Numérotation	Matériau	Epaisseur (cm)	Epaisseur totale (cm)
Dalle de sol	0	Revêtement de sol intérieur	-	86
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Isolation thermique en Liège	20	
	4	Préchape	8	
	5	Radier	25	
	6	Membrane PE	-	
	7	Sable stabilisé	5	
	8	Empierrement	20	
Plancher sur extérieur	9	Géotextile	-	52
	0	Revêtement de sol intérieur	-	
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Membrane Insulit	1	
	4	Préchape technique acoustique/isolante	5	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	18	
	7	Isolation thermique en fibre de bois	15	
Toiture terrasse	8	Enduit extérieur	-	43
	0	Revêtement de sol extérieur	-	
	1	Membrane d'étanchéité TPO	-	
	2	Isolation thermique en PIR	15	
	3	Chape de pente	8	
	4	Membrane pare-vapeur	-	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	15	
Toiture inclinée	7	Plafonnage	-	65,75
	0	Revêtement de toiture	-	
	1	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	
	2a	Charpente en bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	23	
	3	Membrane pare vapeur	-	
	4	Plaque de plâtre	1,25	
	5	Plaque de plâtre	1,25	
	6	Lattage	6	
Mur extérieur	7a	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	56,3
	7b	Plaque de plâtre	1,25	
	0	Revêtement de façade	-	
	1	Plaque de plâtre pare pluie	1,25	
	2a	Ossature bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	23	
	3	Panneau OSB	1,8	
4	Isolation thermique en laine de bois	6		
	5	Plaque de plâtre	1,25	

9.3 Annexe 3 : Compositions de parois de la variante 2 – Traditionnel + isolant biosourcé

Tableau 9.3 - Composition des parois de la variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé

Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé				
Type de parois	Numérotation	Matériau	Epaisseur (cm)	Epaisseur totale (cm)
Dalle de sol	0	Revêtement de sol intérieur	-	86
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Isolation thermique en Liège	20	
	4	Préchape	8	
	5	Radier	25	
	6	Membrane PE	-	
	7	Sable stabilisé	5	
	8	Empierrement	20	
	9	Géotextile	-	
Plancher sur extérieur	0	Revêtement de sol intérieur	-	52
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Membrane Insulit	1	
	4	Préchape technique	5	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	18	
	7	Isolation thermique en fibre de bois	15	
	8	Enduit extérieur	-	
Toiture terrasse	0	Revêtement de sol extérieur	-	52
	1	Membrane d'étanchéité TPO	-	
	2	Isolation thermique en PS	24	
	3	Chape de pente	8	
	4	Membrane pare-vapeur	-	
	5	Chape de compression	5	
	6	Hourdis	15	
	7	Plafonnage	-	
Toiture inclinée	0	Revêtement de toiture	-	65,75
	1	Panneau pare-pluie en fibre de	4	
	2a	Charpente en bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	23	
	3	Membrane pare vapeur	-	
	4	Plaque de plâtre	1,25	
	5	Plaque de plâtre	1,25	
	6	Lattage	6	
	7a	Isolation acoustique en laine	6	
	7b	Plaque de plâtre	1,25	
Mur extérieur	0	Revêtement de façade	-	43
	1	Pare-pluie	-	
	2	Isolation thermique en fibre de bois	24	
	3	Blocs béton	19	
	4	Plafonnage	-	

9.4 Annexe 4 : Compositions de parois de la variante 3 – CLT

Tableau 9.4 - Composition des parois de la variante 3 - CLT

Variante 3 - CLT				
Type de parois	Numérotation	Matériau	Epaisseur (cm)	Epaisseur totale (cm)
Dalle de sol	0	Revêtement de sol intérieur	-	38
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Isolation thermique PUR	10	
	4	CLT	20	
	5	Structure pilotis	dia 35	
Plancher sur extérieur	0	Revêtement de sol intérieur	-	46
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Membrane Insulit	1	
	4	Préchape technique	5	
	5	Membrane PE	-	
	6	CLT	22	
	7	Isolation thermique en panneaux EPS	10	
Toiture terrasse	0	Revêtement de sol extérieur	-	40
	1	Membrane d'étanchéité TPO	-	
	2	Isolation thermique en PUR	12	
	3	Chape de pente	8	
	4	Membrane pare-vapeur	-	
	5	CLT	20	
Toiture inclinée	0	Revêtement de toiture	-	32
	1	Sous toiture	-	
	2	Isolation thermique en PUR	12	
	3	Membrane pare-vapeur	-	
	4	CLT	20	
Mur extérieur	0	Revêtement de façade	-	34
	1	Pare-pluie	-	
	2	Laine minérale	14	
	3	Pare vapeur	-	
	4	CLT	20	

9.5 Annexe 5 : Compositions de parois de la variante 4 – Ossature bois

Tableau 9.5 - Composition des parois de la variante 4 - Ossature bois

Variante 4 - Ossature bois				
Type de parois	Numérotation	Matériau	Epaisseur (cm)	Epaisseur totale (cm)
Dalle de sol	0	Revêtement de sol intérieur	-	58,8
	1	Panneau OSB	2,2	
	2	Contre plancher	8	
	3	Panneau OSB	1,2	
	4a	Solivage (douglas)	23	
	4b	Isolation thermique en cellulose	23	
	5	Membrane pare pluie	-	
	6	Panneau de fibre ciment	1,4	
Plancher sur extérieur	7	Structure pilotis	dia 0,35	66,8
	0	Revêtement de sol intérieur	-	
	1	Chape de finition	8	
	2	Membrane PE	-	
	3	Membrane Insulit	1	
	4	Panneau OSB	1,8	
	5a	Structure bois	30	
	5b	Isolation thermique en cellulose	26	
	6	Membrane pare-pluie	-	
7	Plaque de plâtre	1,25		
Toiture terrasse	8	Enduit extérieur	-	48,55
	0	Revêtement de sol extérieur	-	
	1	Membrane d'étanchéité TPO	-	
	2	Isolation thermique en PUR	14	
	3	Panneau OSB	1,8	
	4	Cale de pente	5	
	5	Gitage	22,5	
Toiture inclinée	6	Lattage	4	65,75
	7	Plaque de plâtre	1,25	
	0	Revêtement de toiture	-	
	1	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	
	2a	Charpente en bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	23	
	3	Membrane pare vapeur	-	
	4	Plaque de plâtre	1,25	
	5	Plaque de plâtre	1,25	
Mur extérieur	6	Lattage	6	51,3
	7a	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	
	7b	Plaque de plâtre	1,25	
	0	Revêtement de façade	-	
	1	Plaque de plâtre pare pluie	1,25	
	2a	Ossature bois	23	
	2b	Isolation thermique en cellulose	18	
3	Panneau OSB	1,8		
4	Isolation thermique en laine de bois	6		
5	Plaque de fermacell	1,25		

9.6 Annexe 6 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur Excel en fonction du système constructif et du type de parois

Tableau 9.6 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur Excel au mètre carré (kgCO₂eq/m²), par type de parois (kgCO₂eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO₂eq) du cas de base et de chaque alternative

	Type de parois	PRG par type de parois	PRG de la parois au m ²	PRG total du bâtiment
Cas de base	Dalle de sol	79461,66 kgCO ₂ eq	194,28 kgCO ₂ eq/m ²	152052,29 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	10040,26 kgCO ₂ eq	96,54 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	7404,17 kgCO ₂ eq	91,41 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	11496,94 kgCO ₂ eq	22,24 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	43649,26 kgCO ₂ eq	50,46 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 1 - Mix	Dalle de sol	81915,07 kgCO ₂ eq	200,28 kgCO ₂ eq/m ²	122384,72 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	8755,12 kgCO ₂ eq	84,18 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	7404,17 kgCO ₂ eq	91,41 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	11496,94 kgCO ₂ eq	22,24 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	12813,42 kgCO ₂ eq	14,81 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Dalle de sol	81506,07 kgCO ₂ eq	199,28 kgCO ₂ eq/m ²	134179,61 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	8583,93 kgCO ₂ eq	82,54 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	6937,20 kgCO ₂ eq	85,64 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	11496,94 kgCO ₂ eq	22,24 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	25655,47 kgCO ₂ eq	29,66 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 3 - CLT	Dalle de sol	15010,31 kgCO ₂ eq	36,70 kgCO ₂ eq/m ²	72187,74 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	6880,10 kgCO ₂ eq	66,15 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	4409,61 kgCO ₂ eq	54,44 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	21468,94 kgCO ₂ eq	41,53 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	24418,79 kgCO ₂ eq	28,23 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 4 - Ossature bois	Dalle de sol	16254,75 kgCO ₂ eq	39,74 kgCO ₂ eq/m ²	47757,17 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	3943,14 kgCO ₂ eq	37,91 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	3248,91 kgCO ₂ eq	40,11 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	11496,94 kgCO ₂ eq	22,24 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	12813,42 kgCO ₂ eq	14,81 kgCO ₂ eq/m ²	

9.7 Annexe 7 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur One Click LCA en fonction du système constructif et du type de parois

Tableau 9.7 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur One Click LCA au mètre carré (kgCO₂eq/m²), par type de parois (kgCO₂eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO₂eq) du cas de base et de chaque alternative

	Type de parois	PRG par type de parois	PRG de la parois au m ²	PRG total du bâtiment
Cas de base	Dalle de sol	73160,00 kgCO ₂ eq	178,88 kgCO ₂ eq/m ²	150750,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	11490,00 kgCO ₂ eq	110,48 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	9940,00 kgCO ₂ eq	122,72 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	14660,00 kgCO ₂ eq	28,36 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	41500,00 kgCO ₂ eq	47,98 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 1 - Mix	Dalle de sol	78160,00 kgCO ₂ eq	191,10 kgCO ₂ eq/m ²	137950,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	11190,00 kgCO ₂ eq	107,60 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	9940,00 kgCO ₂ eq	122,72 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	14660,00 kgCO ₂ eq	28,36 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	24000,00 kgCO ₂ eq	27,75 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Dalle de sol	78160,00 kgCO ₂ eq	191,10 kgCO ₂ eq/m ²	148050,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	11190,00 kgCO ₂ eq	107,60 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	8540,00 kgCO ₂ eq	105,43 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	14660,00 kgCO ₂ eq	28,36 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	35500,00 kgCO ₂ eq	41,04 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 3 - CLT	Dalle de sol	35500,00 kgCO ₂ eq	86,80 kgCO ₂ eq/m ²	117310,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	10780,00 kgCO ₂ eq	103,65 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	7630,00 kgCO ₂ eq	94,20 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	32100,00 kgCO ₂ eq	62,09 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	31300,00 kgCO ₂ eq	36,18 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 4 - Ossature bois	Dalle de sol	16220,00 kgCO ₂ eq	39,66 kgCO ₂ eq/m ²	64280,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	5170,00 kgCO ₂ eq	49,71 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	4230,00 kgCO ₂ eq	52,22 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	14660,00 kgCO ₂ eq	28,36 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	24000,00 kgCO ₂ eq	27,75 kgCO ₂ eq/m ²	

9.8 Annexe 8 : Résumé des résultats de l'ACV réalisée sur TOTEM en fonction du système constructif et du type de parois

Tableau 9.8 - Résumé des résultats du PRG réalisé sur TOTEM au mètre carré (kgCO₂eq/m²), en fonction du système constructif pour chaque type de parois (kgCO₂eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO₂eq)

	Type de parois	PRG par type de parois	PRG de la parois au m ²	PRG total du bâtiment
Cas de base	Dalle de sol	95931,00 kgCO ₂ eq	234,55 kgCO ₂ eq/m ²	224694,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	12312,00 kgCO ₂ eq	118,38 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	15903,00 kgCO ₂ eq	196,33 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	20007,00 kgCO ₂ eq	38,70 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	80541,00 kgCO ₂ eq	93,11 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 1 - Mix	Dalle de sol	100548,00 kgCO ₂ eq	245,84 kgCO ₂ eq/m ²	182628,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	16929,00 kgCO ₂ eq	162,78 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	15903,00 kgCO ₂ eq	196,33 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	20007,00 kgCO ₂ eq	38,70 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	29241,00 kgCO ₂ eq	33,80 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Dalle de sol	100548,00 kgCO ₂ eq	245,84 kgCO ₂ eq/m ²	228798,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	16929,00 kgCO ₂ eq	162,78 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	16416,00 kgCO ₂ eq	202,67 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	20007,00 kgCO ₂ eq	38,70 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	74898,00 kgCO ₂ eq	86,59 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 3 - CLT	Dalle de sol	28215,00 kgCO ₂ eq	68,99 kgCO ₂ eq/m ²	124659,00 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	9747,00 kgCO ₂ eq	93,72 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	8208,00 kgCO ₂ eq	101,33 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	28215,00 kgCO ₂ eq	54,57 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	50274,00 kgCO ₂ eq	58,12 kgCO ₂ eq/m ²	
Variante 4 - Ossature bois	Dalle de sol	18468,00 kgCO ₂ eq	45,15 kgCO ₂ eq/m ²	77770,80 kgCO ₂ eq
	Plancher sur extérieur	4924,80 kgCO ₂ eq	47,35 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture plate	5130,00 kgCO ₂ eq	63,33 kgCO ₂ eq/m ²	
	Toiture inclinée	20007,00 kgCO ₂ eq	38,70 kgCO ₂ eq/m ²	
	Mur extérieur	29241,00 kgCO ₂ eq	33,80 kgCO ₂ eq/m ²	

9.9 Annexe 9 : Résumé des résultats de l'ACV du cas de base en fonction des matériaux

Tableau 9.9 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux du cas de base et de l'outil utilisé (kgCO₂eq/m²)

Cas de base			
Type de parois	Matériau	Epaisseur (cm)	One Click LCA
Dalle de sol	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,63 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique PUR	12	18,00 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape	8	16,63 kgCO ₂ eq/m ²
	Radier	25	85,57 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Sable stabilisé	5	1,17 kgCO ₂ eq/m ²
	Empierrement	20	19,80 kgCO ₂ eq/m ²
Géotextile	-	1,42 kgCO ₂ eq/m ²	
Plancher sur extérieur	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,35 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane Insulit	1	2,79 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape technique acoustique/isolante	5	16,35 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Hourdis	18	38,46 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en panneaux PUR	10	14,30 kgCO ₂ eq/m ²
Enduit extérieur	-	-	
Toiture plate	Revêtement de sol extérieur	-	-
	Membrane d'étanchéité TPO	-	17,28 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PIR	15	33,33 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de pente	8	16,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Hourdis	15	38,27 kgCO ₂ eq/m ²
Plafonnage	-	2,26 kgCO ₂ eq/m ²	
Toiture inclinée	Revêtement de toiture	-	-
	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	1,32 kgCO ₂ eq/m ²
	Charpente en bois	23	8,12 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	23	1,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Lattage	6	2,13 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	0,77 kgCO ₂ eq/m ²
Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²	
Mur extérieur	Revêtement de façade	-	-
	Membrane pare-pluie	-	4,61 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PUR	14	19,70 kgCO ₂ eq/m ²
	Blocs béton	19	21,97 kgCO ₂ eq/m ²
	Plafonnage	-	2,26 kgCO ₂ eq/m ²

9.10 Annexe 10 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 1 en fonction des matériaux

Tableau 9.10 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 1 et de l'outil utilisé (kgCO₂eq/m²)

Variante 1 - Mix			
Type de parois	Matériau	Epaisseur (cm)	One Click LCA
Dalle de sol	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en Liège	20	58,68 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape	8	16,63 kgCO ₂ eq/m ²
	Radier	25	56,23 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Sable stabilisé	5	1,17 kgCO ₂ eq/m ²
	Empierrement	20	19,80 kgCO ₂ eq/m ²
Plancher sur extérieur	Géotextile	-	1,42 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane Insulit	1	2,79 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape technique acoustique/isolante	5	16,35 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Hourdis	18	38,46 kgCO ₂ eq/m ²
Isolation thermique en fibre de bois	15	11,54 kgCO ₂ eq/m ²	
Toiture plate	Enduit extérieur	-	-
	Revêtement de sol extérieur	-	-
	Membrane d'étanchéité TPO	-	17,28 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PIR	15	33,33 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de pente	8	16,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture inclinée	Hourdis	15	38,27 kgCO ₂ eq/m ²
	Plafonnage	-	2,26 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de toiture	-	-
	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	1,32 kgCO ₂ eq/m ²
	Charpente en bois	23	8,12 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	23	1,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	Lattage	6	2,13 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	0,77 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de façade	-	-
	Plaque de plâtre pare-pluie	1,25	3,82 kgCO ₂ eq/m ²
	Ossature bois	23	5,78 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	Isolation thermique en cellulose	18	1,27 kgCO ₂ eq/m ²
	Panneau OSB	1,8	4,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en laine de bois	6	9,36 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²

9.11 Annexe 11 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 2 en fonction des matériaux

Tableau 9.11 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 2 et de l'outil utilisé (kgCO₂eq/m²)

Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé			
Type de parois	Matériau	Epaisseur (cm)	One Click LCA
Dalle de sol	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en Liège	20	58,68 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape	8	16,63 kgCO ₂ eq/m ²
	Radier	25	56,23 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Sable stabilisé	5	1,17 kgCO ₂ eq/m ²
	Empierrement	20	19,80 kgCO ₂ eq/m ²
	Géotextile	-	1,42 kgCO ₂ eq/m ²
Plancher sur extérieur	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane Insulit	1	2,79 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape technique acoustique/isolante	5	16,35 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Hourdis	18	38,46 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en fibre de bois	15	11,54 kgCO ₂ eq/m ²
	Enduit extérieur	-	-
Toiture plate	Revêtement de sol extérieur	-	-
	Membrane d'étanchéité TPO	-	17,28 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PS	24	16,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de pente	8	16,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de compression	5	11,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Hourdis	15	38,27 kgCO ₂ eq/m ²
	Plafonnage	-	2,26 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture inclinée	Revêtement de toiture	-	-
	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	1,32 kgCO ₂ eq/m ²
	Charpente en bois	23	8,12 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	23	1,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Lattage	6	2,13 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	0,77 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	Revêtement de façade	-	-
	Membrane pare-pluie	-	4,61 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en fibre de bois	24	12,72 kgCO ₂ eq/m ²
	Blocs béton	19	21,97 kgCO ₂ eq/m ²
	Plafonnage	-	2,26 kgCO ₂ eq/m ²

9.12 Annexe 12 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 3 en fonction des matériaux

Tableau 9.12 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 3 et de l'outil utilisé (kgCO₂eq/m²)

Variante 3 - CLT			
Type de parois	Matériau	Epaisseur (cm)	One Click LCA
Dalle de sol	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,27 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique PUR	10	14,30 kgCO ₂ eq/m ²
	CLT	20	24,93 kgCO ₂ eq/m ²
	Structure pilotis	dia 35	9,05 kgCO ₂ eq/m ²
Plancher sur extérieur	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane Insulit	1	2,79 kgCO ₂ eq/m ²
	Préchape technique acoustique/isolante	5	16,35 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	CLT	22	27,88 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en panneaux EPS	10	6,63 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture plate	Enduit extérieur	-	-
	Revêtement de sol extérieur	-	-
	Membrane d'étanchéité TPO	-	17,28 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PUR	12	18,00 kgCO ₂ eq/m ²
	Chape de pente	8	16,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture inclinée	CLT	20	24,93 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de toiture	-	-
	Sous toiture	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PUR	12	18,00 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	CLT	20	24,93 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de façade	-	-
	Membrane pare-pluie	-	4,61 kgCO ₂ eq/m ²
	Laine minérale	14	2,89 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²

9.13 Annexe 13 : Résumé des résultats de l'ACV de la variante 4 en fonction des matériaux

Tableau 9.13 - Résumé des résultats du PRG en fonction des matériaux de la variante 4 et de l'outil utilisé (kgCO₂eq/m²)

Variante 4 - Ossature bois			
Type de parois	Matériau	Epaisseur (cm)	One Click LCA
Dalle de sol	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Panneau OSB	2,2	4,89 kgCO ₂ eq/m ²
	Contre plancher	8	2,93 kgCO ₂ eq/m ²
	Panneau OSB	1,2	2,69 kgCO ₂ eq/m ²
	Solivage (douglas)	23	4,40 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	23	1,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-pluie	-	4,61 kgCO ₂ eq/m ²
	Panneau de fibre ciment	1,4	9,29 kgCO ₂ eq/m ²
Plancher sur extérieur	Structure pilotis	dia 0,35	9,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de sol intérieur	-	-
	Chape de finition	8	16,49 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane PE	-	10,43 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane Insulit	1	2,79 kgCO ₂ eq/m ²
	Panneau OSB	1,8	4,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Structure bois	30	5,87 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	26	1,73 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare-pluie	-	4,61 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture plate	Enduit extérieur	-	-
	Revêtement de sol extérieur	-	-
	Membrane d'étanchéité TPO	-	17,28 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en PUR	14	19,70 kgCO ₂ eq/m ²
	Panneau OSB	1,8	4,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Cale de pente	5	1,48 kgCO ₂ eq/m ²
	Gitage	22,5	4,12 kgCO ₂ eq/m ²
	Lattage	4	1,73 kgCO ₂ eq/m ²
Toiture inclinée	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de toiture	-	-
	Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	1,32 kgCO ₂ eq/m ²
	Charpente en bois	23	8,12 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	23	1,51 kgCO ₂ eq/m ²
	Membrane pare vapeur	-	4,06 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Lattage	6	2,13 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	Isolation acoustique en laine d'herbe	6	0,77 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²
	Revêtement de façade	-	-
	Plaque de plâtre pare-pluie	1,25	3,82 kgCO ₂ eq/m ²
	Ossature bois	23	5,78 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en cellulose	18	1,27 kgCO ₂ eq/m ²
Mur extérieur	Panneau OSB	1,8	4,05 kgCO ₂ eq/m ²
	Isolation thermique en laine de bois	6	9,36 kgCO ₂ eq/m ²
	Plaque de plâtre	1,25	3,47 kgCO ₂ eq/m ²

9.14 Annexe 14 : Résumé des résultats de l'étude du coût en fonction du système constructif et du type de parois

Tableau 9.14 - Résumé des résultats de l'étude du coût au mètre carré (kgCO₂eq/m²), en fonction du système constructif pour chaque type de parois (kgCO₂eq) et pour la totalité du bâtiment (kgCO₂eq)

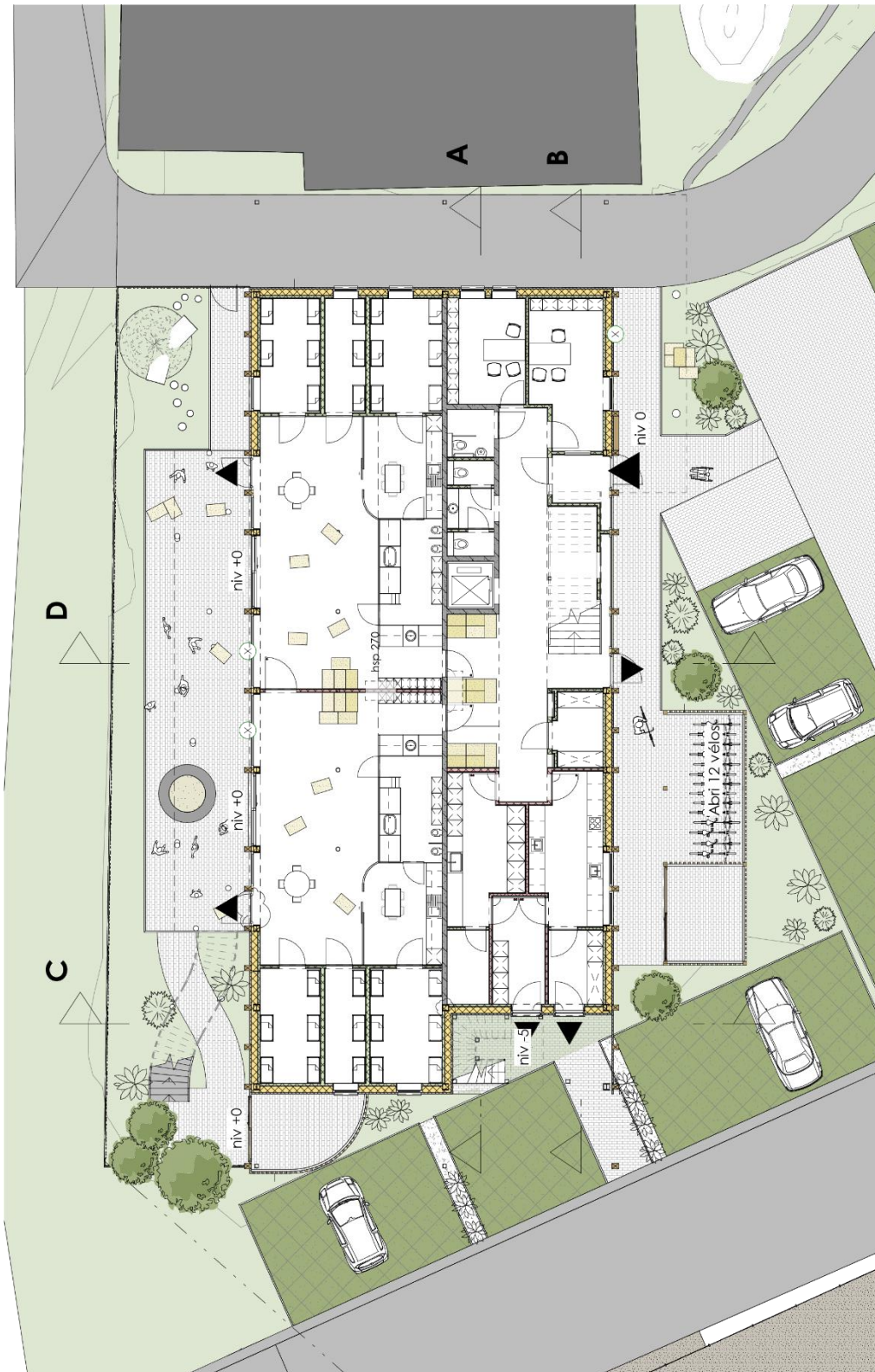
	Type de parois	Coût de la parois au m ² (€/m ²)	Coût par type de parois	Coût total du bâtiment
Cas de base	Dalle de sol	237,48 €/m ²	97.127,68 €	410.444,59 €
	Plancher sur extérieur	203,91 €/m ²	21.818,16 €	
	Toiture plate	293,60 €/m ²	23.781,60 €	
	Toiture inclinée	267,97 €/m ²	138.541,94 €	
	Mur extérieur	149,34 €/m ²	129.175,21 €	
Variante 1 - Mix	Dalle de sol	316,57 €/m ²	129.475,49 €	511.283,30 €
	Plancher sur extérieur	205,00 €/m ²	21.934,64 €	
	Toiture plate	293,60 €/m ²	23.781,60 €	
	Toiture inclinée	267,97 €/m ²	138.541,94 €	
	Mur extérieur	228,38 €/m ²	197.549,63 €	
Variante 2 - Traditionnel + isolant biosourcé	Dalle de sol	316,57 €/m ²	129.475,49 €	447.804,65 €
	Plancher sur extérieur	205,00 €/m ²	21.934,64 €	
	Toiture plate	297,87 €/m ²	24.127,47 €	
	Toiture inclinée	267,97 €/m ²	138.541,94 €	
	Mur extérieur	154,60 €/m ²	133.725,11 €	
Variante 3 - CLT	Dalle de sol	370,67 €/m ²	151.603,94 €	717.593,19 €
	Plancher sur extérieur	383,29 €/m ²	41.012,40 €	
	Toiture plate	418,21 €/m ²	33.875,01 €	
	Toiture inclinée	356,47 €/m ²	184.294,99 €	
	Mur extérieur	354,69 €/m ²	306.806,85 €	
Variante 4 - Ossature bois	Dalle de sol	299,70 €/m ²	122.576,54 €	500.479,33 €
	Plancher sur extérieur	234,50 €/m ²	25.092,01 €	
	Toiture plate	206,41 €/m ²	16.719,21 €	
	Toiture inclinée	267,97 €/m ²	138.541,94 €	
	Mur extérieur	228,38 €/m ²	197.549,63 €	

9.15 Annexe 15 : Bordereau de prix

Tableau 9.15 - Résumé des coûts à l'unité des matériaux pose comprise

Matériaux	Epaisseur (cm)	Coût	Unité
Isolation thermique en PS	24	60,27	€/m ²
Blocs béton	19	373,45	€/m ³
Plafonnage pour mur	-	16,14	€/m ²
Isolation thermique PUR	10	35,88	€/m ²
Sous toiture	-	18	€/m ²
Isolation thermique en PUR	12	43,06	€/m ²
Laine minérale	14	47,28	€/m ²
CLT	20	260	€/m ²
Panneau de fibre ciment	1,4	164	€/m ²
Structure pilotis	dia 0,35	450	pièce
Contre plancher	8	60	€/m ²
Membrane pare-pluie	-	12	€/m ²
Isolation thermique en PUR	14	50,24	€/m ²
Cale de pente	5	25,43	€/m ²
Lattage	4	28	€/m ²
Empierrement (déblais compris)	20	57,98	€/m ³
Géotextile	-	2,37	€/m ²
Préchape	8	19,67	€/m ²
Radier	25	520	€/m ³
Sable stabilisé	5		
Isolation thermique en Liège	20	122,15	€/m ²
Chape de finition	8	18,78	€/m ²
Membrane PE	-	12	€/m ²
Membrane Insulit	1	10	€/m ²
Préchape technique acoustique/isolante	5	28	€/m ²
Chape de compression	5	105,13	€/m ²
Hourdis	18		
Isolation thermique en fibre de bois	15	37	€/m ²
Membrane d'étanchéité TPO	-	52,25	€/m ²
Isolation thermique en PIR	15	56	€/m ²
Chape de pente	8	27,49	€/m ²
Membrane pare-vapeur	-	35,41	€/m ²
Plafonnage pour plafond	-	17,32	€/m ²
Panneau pare-pluie en fibre de bois	4	32,06	€/m ²
Charpente en bois	23	105	€/m ²
Isolation thermique en cellulose	23	113,14	€/m ³
Plaque de plâtre	1,25	43,34	€/m ²
Lattage	6	35	€/m ²
Isolation acoustique en laine d'herbe	6	35	€/m ²
Plaque de plâtre pare pluie	1,25	32	€/m ²
Ossature bois	23	105	€/m ²
Panneau OSB	1,8	18	€/m ²
Isolation thermique en laine de bois	6	101,98	€/m ²

9.16 Annexe 16 : Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude



Plan du rez-de-chaussée
Ech 1 : 200

Figure 9.1 - Plan du rez-de-chaussée du cas d'étude

9.17 Annexe 17 : Plan du 1^{er} étage du cas d'étude

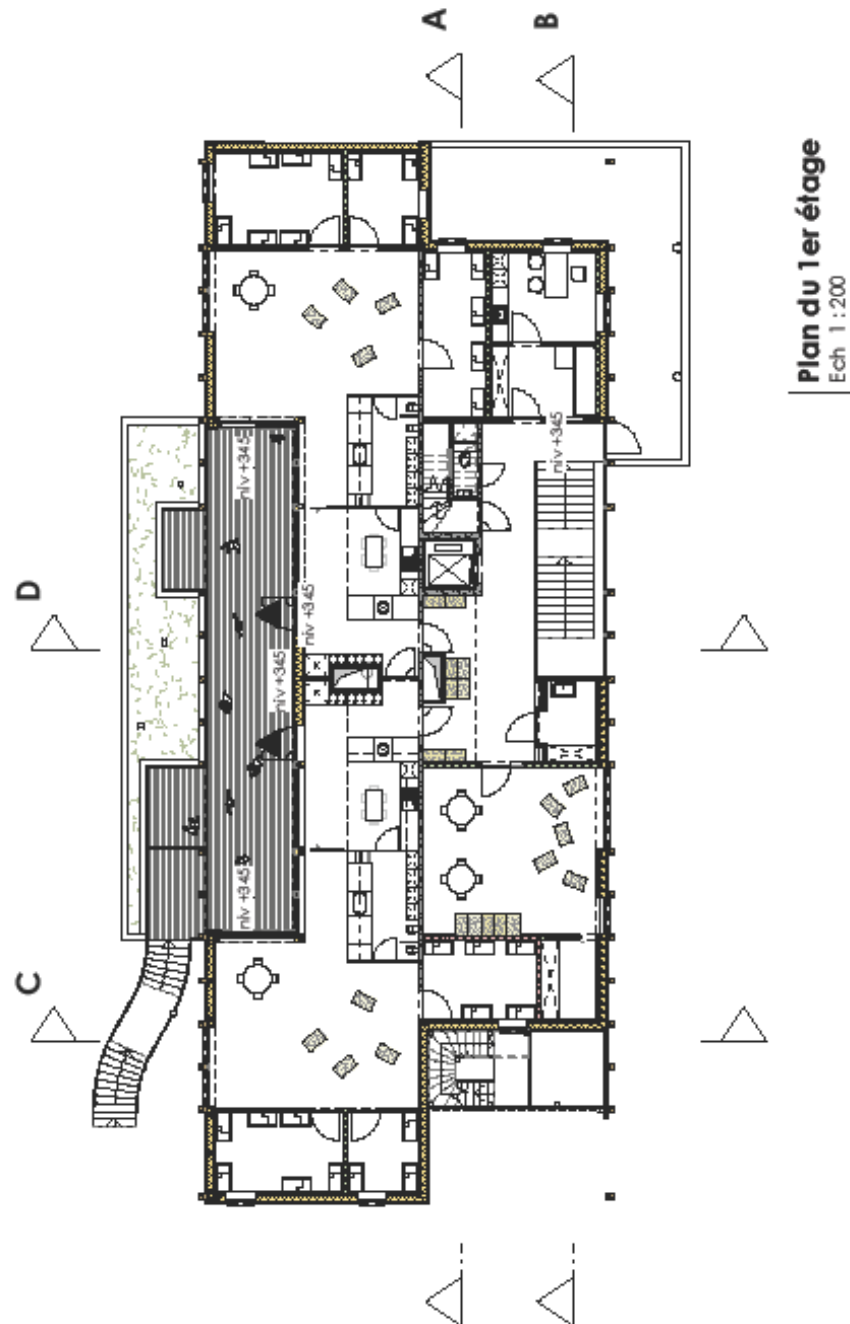


Figure 9.2 - Plan du R+1 du cas d'étude

9.18 Annexe 18 : Plan du 2^e étage du cas d'étude

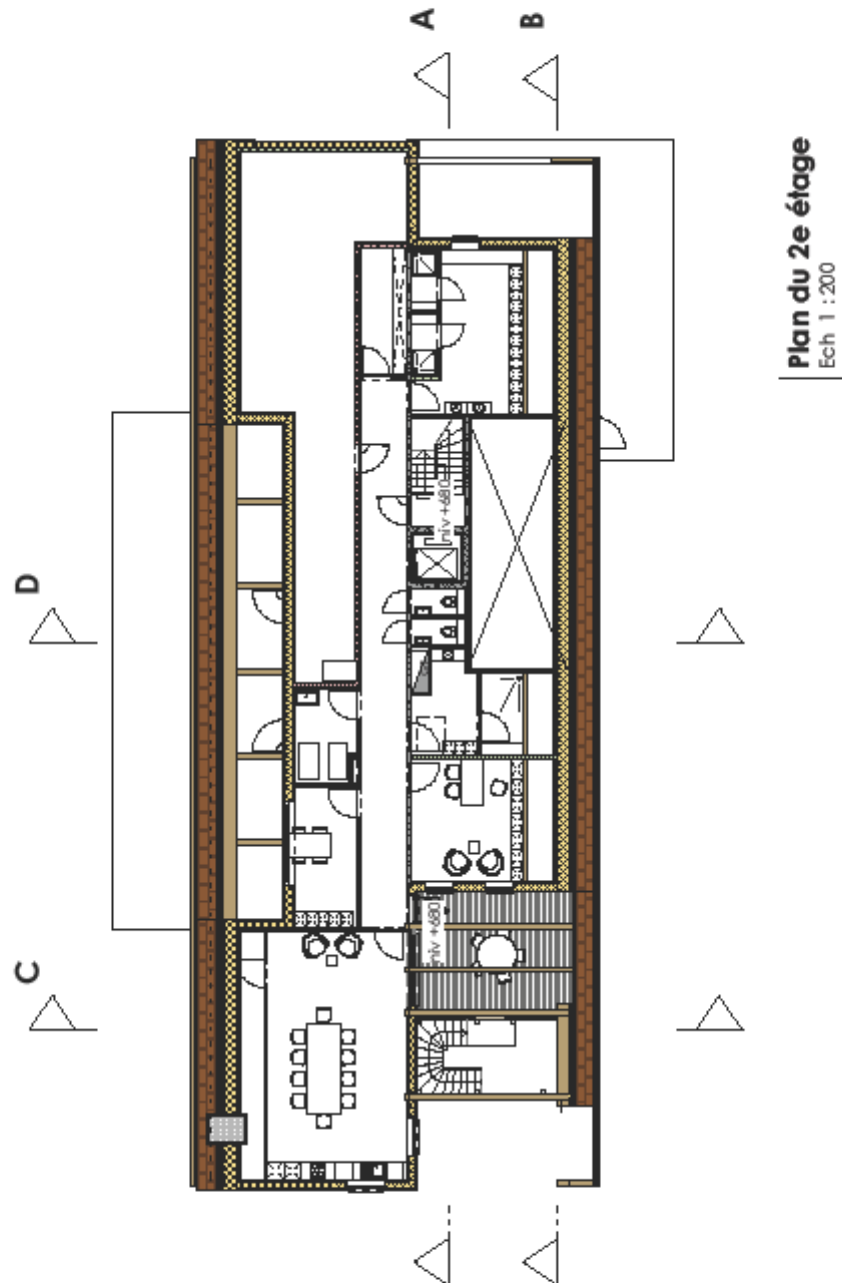


Figure 9.3 - Plan du R+2 du cas d'étude

9.19 Annexe 19 : Coupes longitudinales du cas d'étude

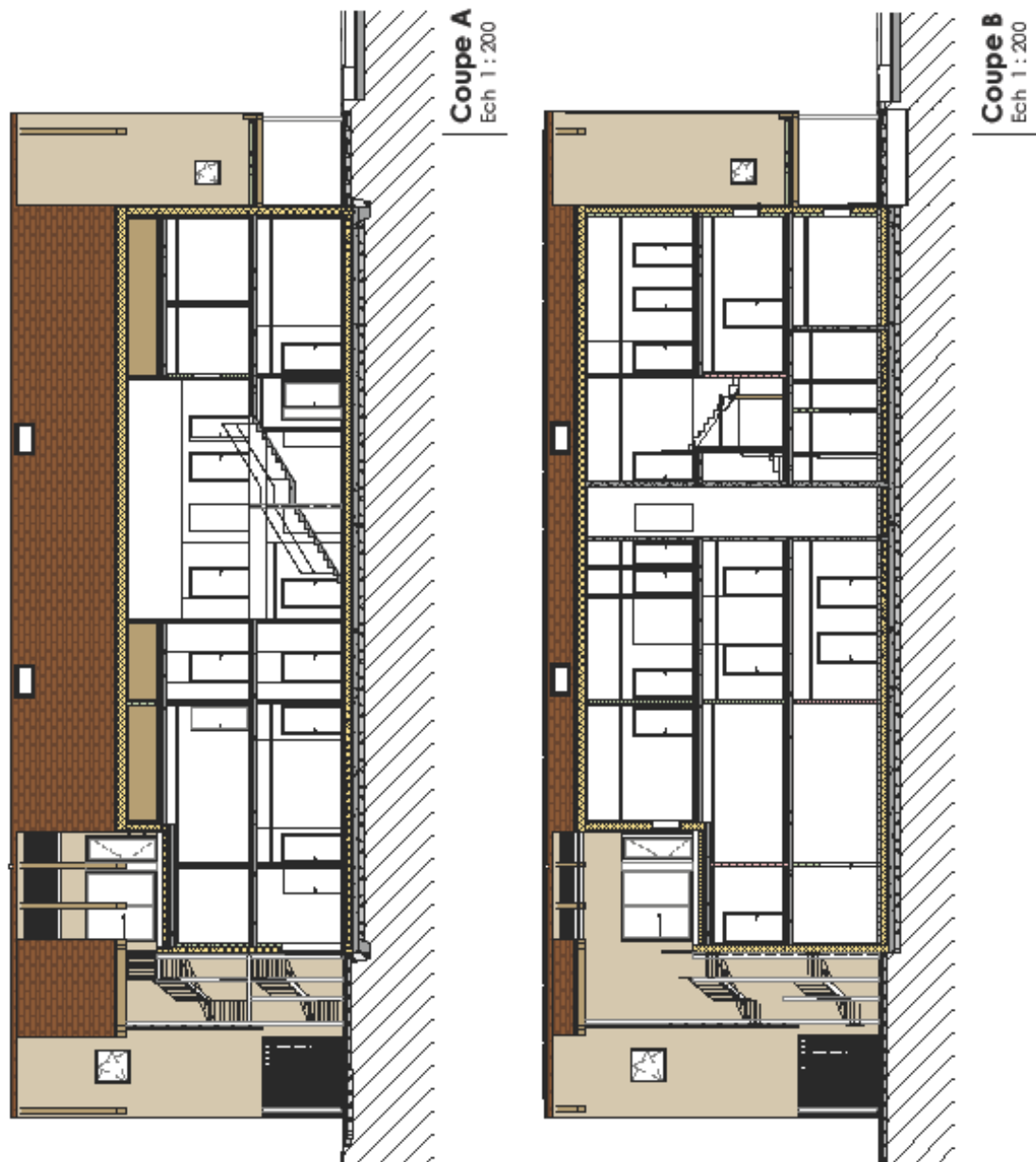


Figure 9.4 - Coupes longitudinales du cas d'étude

9.20 Annexe 20 : Coupes transversales du cas d'étude

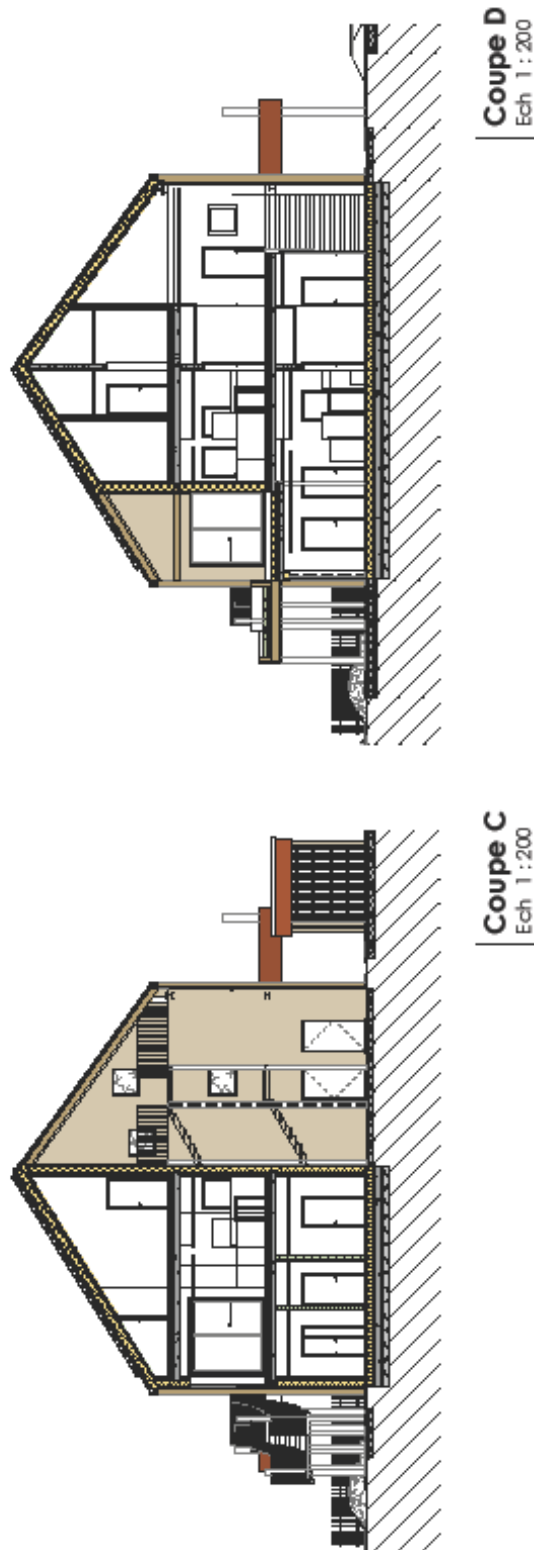


Figure 9.5 - Coupes transversales du cas d'étude

9.21 Annexe 21 : Compositions de parois du cas de base

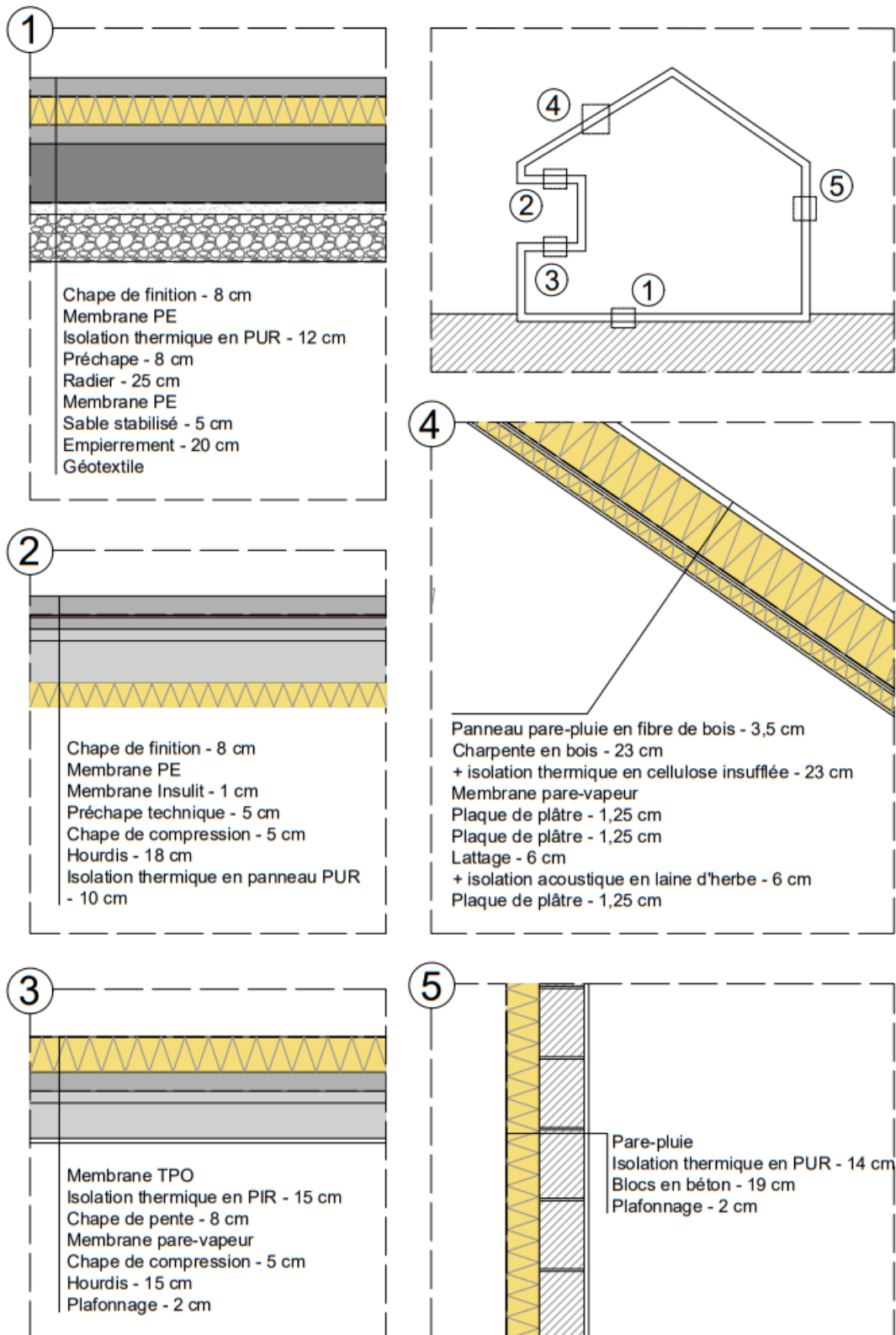


Figure 9.6 - Compositions de parois du cas de base - Ossature traditionnelle avec isolant classique

9.22 Annexe 22 : Compositions de parois de la variante 1

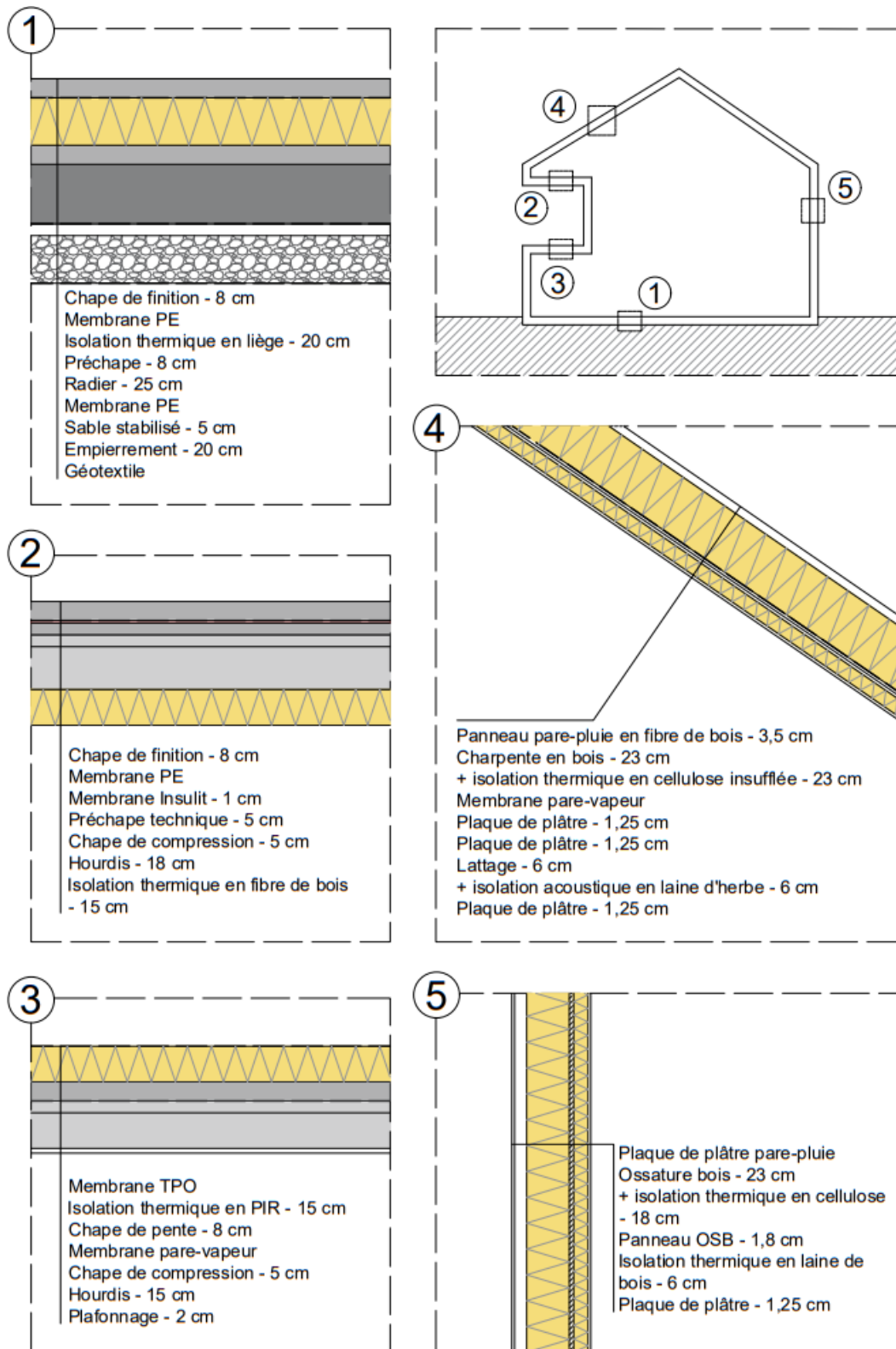


Figure 9.7 - Compositions de parois de la variante 1 – Traditionnel

9.23 Annexe 23 : Compositions de parois de la variante 2

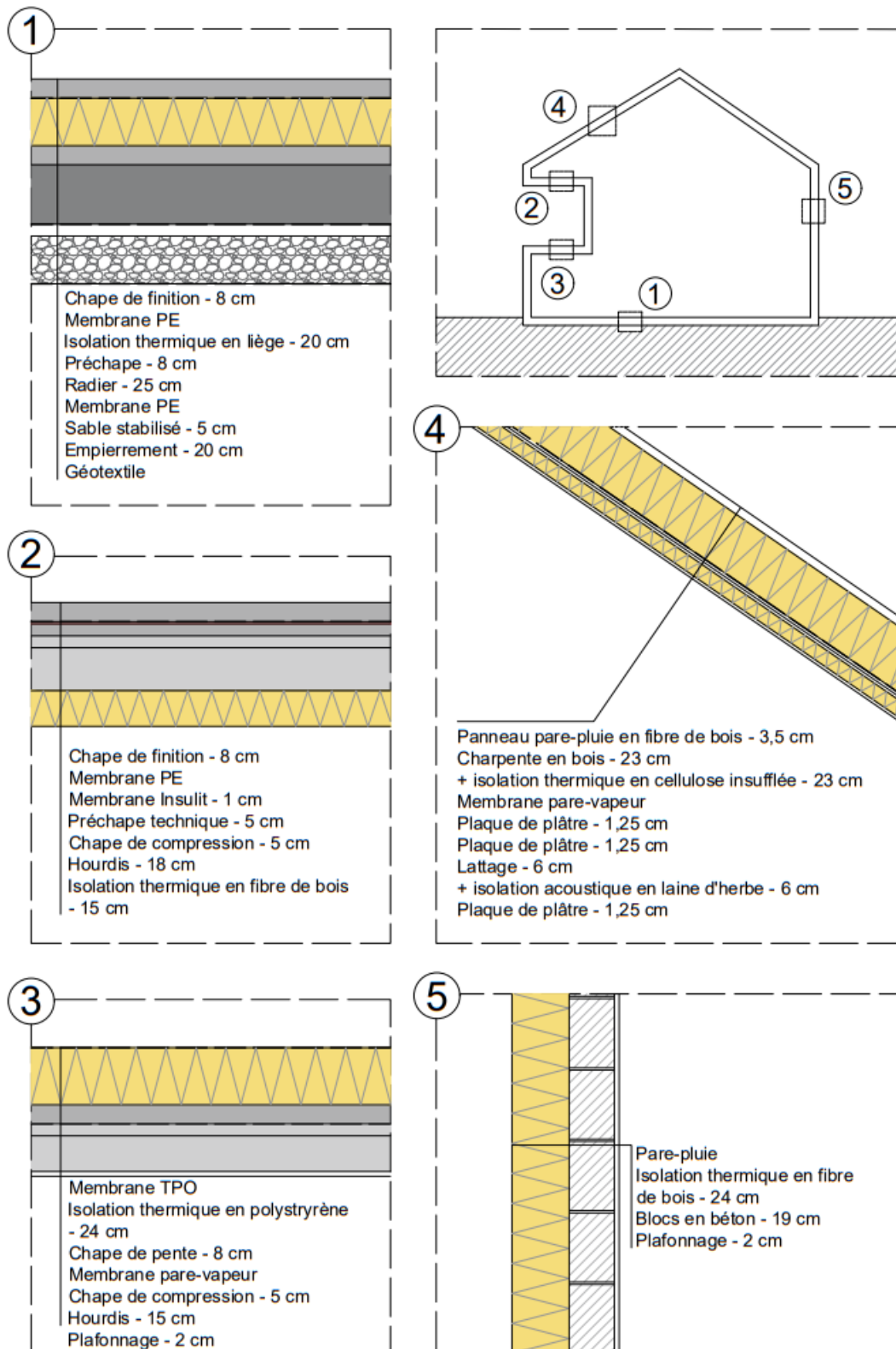


Figure 9.8 - Compositions de parois de la variante 2 – Traditionnel + isolant biosourcé

9.24 Annexe 24 : Compositions de parois de la variante 3

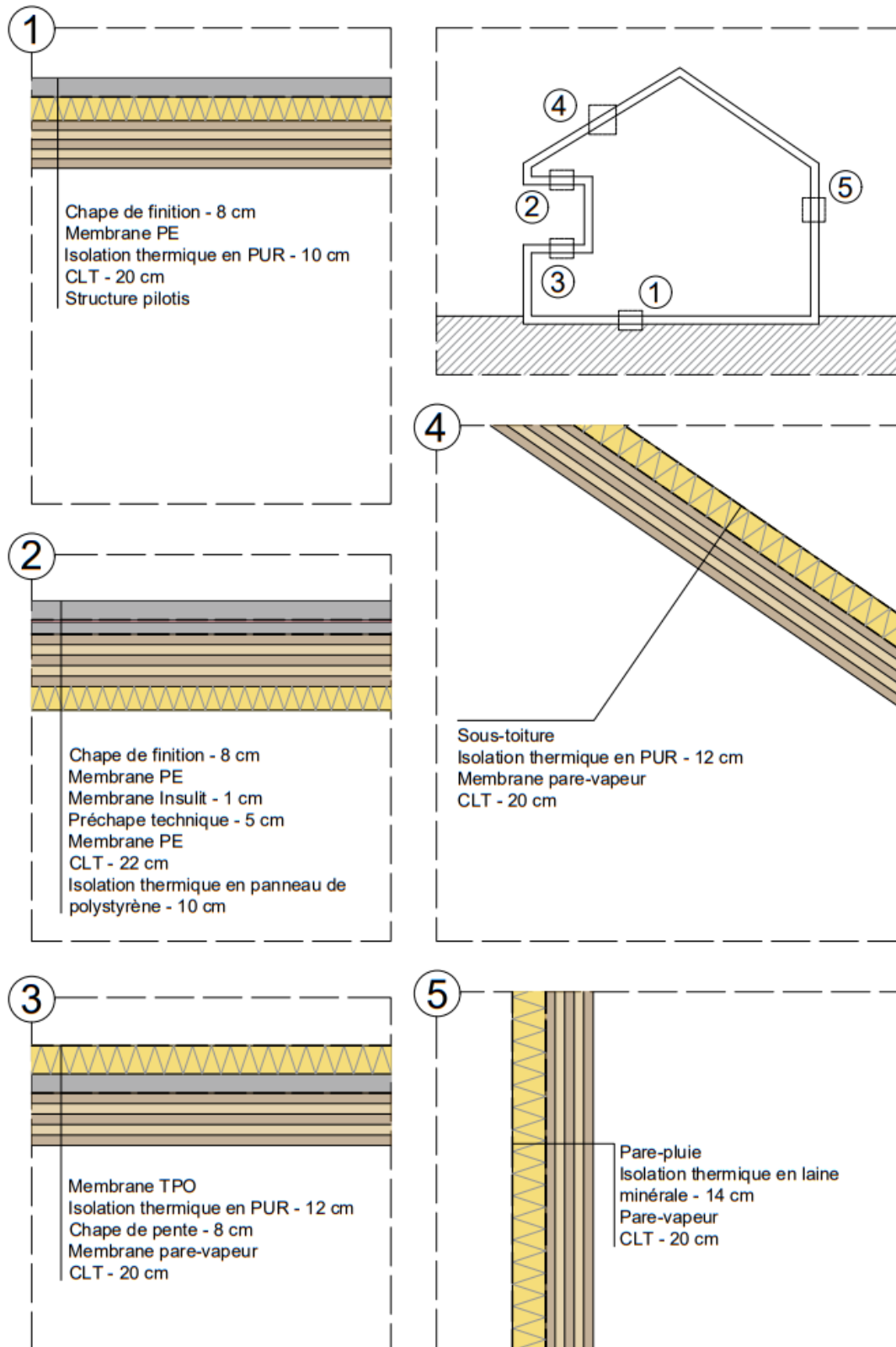


Figure 9.9 - Compositions de parois de la variante 3 – CLT

9.25 Annexe 25 : Compositions de parois de la variante 4

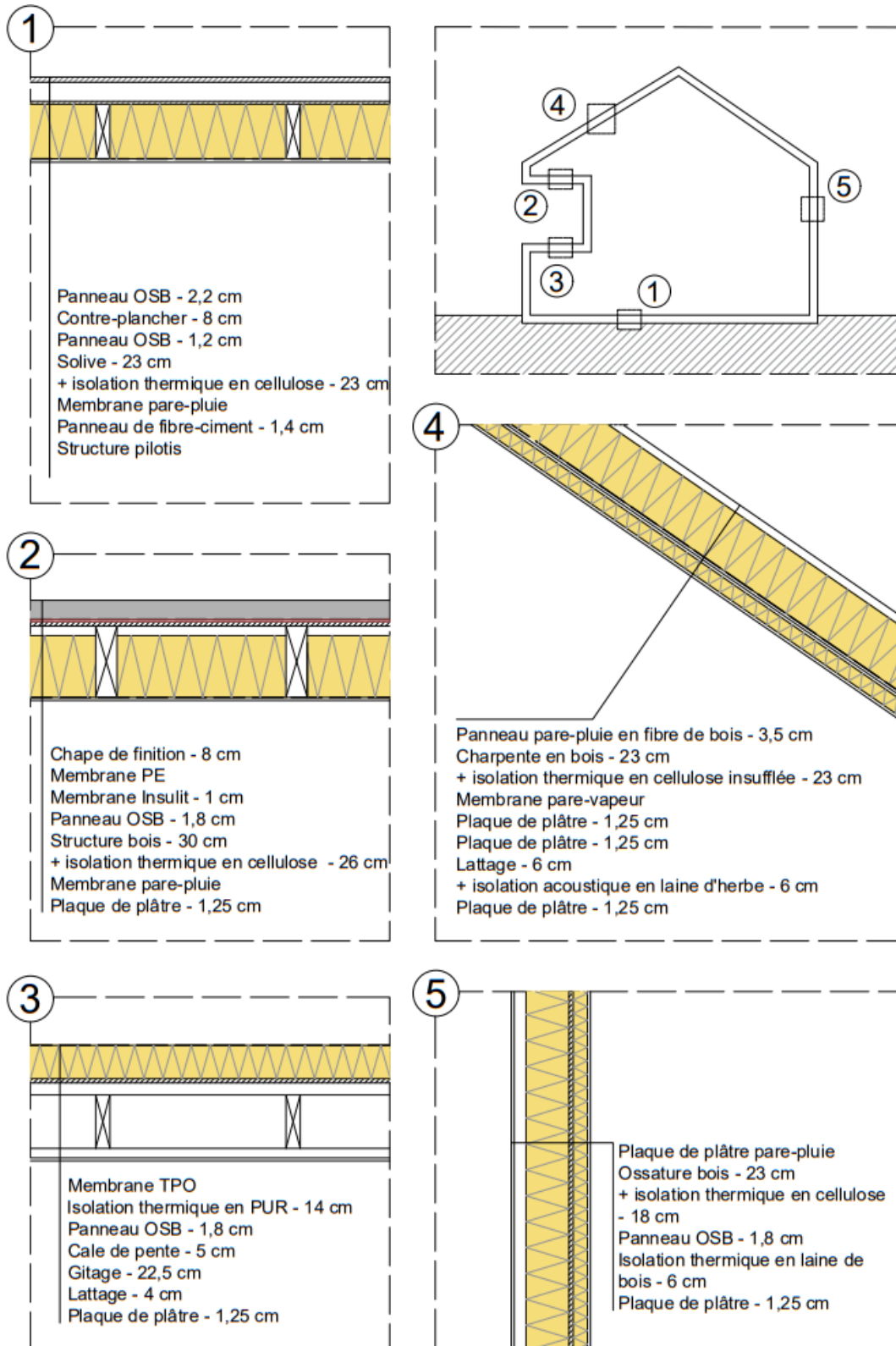


Figure 9.10 - Compositions de parois de la variante 4 – Ossature bois

9.26 Annexe 26 : Certificat Label Produit Bio-sourcé - KENOVEL



Certificat Label Produit Biosourcé N° BE/01/09/23-100

En application des règles générales et du référentiel du Label Produit Biosourcé,

la société :

Raison sociale : **KENOVEL**

Siège social : Avenue Newton 9 1300 Wavre

est autorisée à apposer la marque « Produit Biosourcé » sur le produit, sur les emballages et sur tout document concernant directement le produit désigné sous la référence commerciale :

Granulés de liège—CORK 3-10 mm—Densité 60-70 kg/m³ - sac de 15 kg (250l)

et fabriqué par les usines de :

ARMORIM CORK INSULATION rua de Meladas 260 4535-186 Mozelos VFR PORTUGAL

avec les caractéristiques certifiées ci-dessous :

Biosourcé à 100%

Ce certificat atteste que ce produit a fait l'objet d'un audit sur le site de fabrication, suivant la méthode du bilan matières, telle que décrite dans la EN 16785-2 :2018 « Produits biosourcés —Teneur biosourcée —Partie 2 : Détermination de la teneur biosourcée à l'aide de la méthode basée sur le bilan matières », ou la méthode de détermination de la teneur biosourcée par une analyse au radiocarbone, telle que décrite dans la EN 16785-1 :2016 « Produits biosourcés —Teneur biosourcée —Partie 1 : Détermination de la teneur biosourcée par une analyse au radiocarbone et une analyse élémentaire ».

Ce certificat a été délivré le 01-09-2023 et, sauf décision ultérieure à la présente certification, due en particulier à une modification du produit, est valable jusqu'au 01-09-2026.

Pour le Comité de Label Produit Biosourcé

Anne-Michèle JANSSEN


Directrice ff

Cluster Eco-construction



Figure 9.11 - Certificat Label Produit Biosourcé du liège KENOVEL

9.27 Annexe 27 : SDB Poster



Analyse multicritère du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment d'un point de vue écologique et économique

Authors: Léa Smets

E-mail: lsmets@student.uliege.be
Address: Sustainable Building Design Lab
Quartier Polytech 1
Allée de la Découverte 9
4000 Liège, Belgium
www.sbd.ulg.ac.be
Tel: +32 43.66.91.55
Fax: +32 43.66.29.09

RÉSUMÉ

Le but de cette recherche est de faciliter le choix du système constructif des parois de l'enveloppe d'un bâtiment par une analyse de leur impact environnemental et économique. Cette étude se fait à la phase Concept Design et est divisée en deux parties : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et l'étude du coût. L'ACV est réalisée de manière itérative à partir de trois outils. Les résultats permettent de comparer ces différents outils d'un point de vue de la fiabilité des données, des méthodes utilisées et de la précision. L'étude du coût se fait manuellement à partir d'un quantitatif des matériaux et un bordereau de prix. Les résultats des deux analyses sont ensuite mis en parallèles afin d'identifier les systèmes constructifs les plus ou moins contributeurs au niveau du réchauffement climatique et du coût et permettre d'identifier des pistes de réflexion.

MOTS-CLÉS

Analyse multicritère, Système constructif, Potentiel de réchauffement climatique, Analyse du cycle de vie, Etude du coût, système constructif, One Click LCA, TOTEM, Belgique.

PROBLÉMATIQUE

Le bureau d'architecture Hélium 3 œuvre à concevoir des architectures positives. Conscients de l'impact du domaine de la construction sur l'environnement, ils ont à cœur de proposer aux clients des solutions les plus écologiques possibles. Pour ces raisons et afin d'obtenir des subsides, ils se sont engagés à concevoir un bâtiment à énergie positive dont l'enveloppe est composée de 95% d'isolants bio-sourcés. Suite à leur engagement, ils souhaitent pouvoir évaluer l'impact environnemental et économique de quatre systèmes constructifs.

OBJECTIFS

L'objectif de cette recherche est de quantifier l'impact environnemental et budgétaire du choix de système constructif pour les parois de l'enveloppe d'un bâtiment en phase de Concept Design. L'intérêt est de préparer les concepteurs de bâtiment à s'adapter aux futures réglementations belges et de leur donner, ainsi qu'aux maîtres d'ouvrages, un ordre de comparaison des impacts engendrés.

AUDIENCE

Le bureau d'architecture Hélium 3, Les concepteurs de bâtiment (ingénieurs et architectes), Les maîtres d'ouvrage

QUESTIONS DE RECHERCHE

1. Comment faciliter la comparaison de différentes techniques de construction durable au stade « Concept Design » d'un point de vue environnemental et économique pour les architectes soucieux de l'intégration environnementale ?
2. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue environnemental ?
3. Quelle est la meilleure technique de construction durable du point de vue économique ?

VALEUR AJOUTÉE

Cette recherche est avant-gardiste et permet de guider les choix des concepteurs afin d'anticiper de probables futures évaluations telles que celles imposées par le Guide RE2020 en France. De plus, elle met en parallèle le coût environnemental et budgétaire, ce qui permet au maître d'ouvrage et aux concepteurs de choisir un ou plusieurs systèmes constructifs en connaissance des impacts qu'ils engendrent.

MÉTHODOLOGIE

Les quantitatifs sont estimés à partir d'une maquette numérique 3D simplifiée du cas d'étude et des systèmes constructifs élaborés en collaboration avec le bureau d'architecture Hélium 3.

Les Potentiels de Réchauffement Globaux (PRG) sont calculés via l'ACV. Ce processus itératif a été réalisé via trois outils :

- L'outil One Click LCA (OCL) avec comme données d'entrées les valeurs mentionnées dans les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES) de la base de données INIES.
- L'outil TOTEM avec comme données d'entrées les valeurs mentionnées dans les Déclarations Environnementales de Produits (DEP) issues de la base de données Ecoinvent 3.6 et B-EPD
- L'outil Excel avec les mêmes données que pour l'outil OCL.

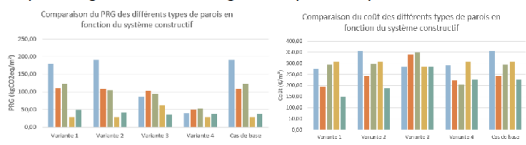
Les coûts sont estimés à partir d'un bordereau de prix réalisé à partir des moyennes des offres de prix communiquées par différents entrepreneurs.

RÉSULTATS

Les résultats d'ACV étudiés sont ceux issus de l'outil OCL. Néanmoins, au vu de leur manque de fiabilité et de transparence, ils ne permettent pas d'être conclusifs. Ils sont donc donnés à titre indicatifs.

Au même titre, les résultats de l'étude du coût est donnée à titre indicatif au vu de la disparité des offres de prix des entrepreneurs.

Les diagrammes ci-dessous permettent de comparer les différents types de parois étudiés selon leur système constructif au niveau du PRG par m² de parois à gauche et du coût également par m² de parois à droite.



Ces résultats sont ensuite mis en parallèles et synthétisés sous forme d'un tableau. Ce dernier met évidence l'augmentation ou la diminution du PRG et du coût des différents systèmes constructifs de chaque parois. Ces valeurs sont données en pourcentage par rapport au système constructif le plus classique qui correspond à la variante une. Des recommandations pour les concepteurs et les maîtres d'ouvrages sont ensuite formulées.

CONCLUSION

Tout d'abord, dans l'ACV, le manque de fiabilité des données est une cause de grande disparité entre les résultats. Certains types de produits disposent d'un grand nombre de DEP dont les valeurs des indicateurs peuvent doubler voir parfois même tripler. De plus, la majorité des données ne correspondent pas au contexte belge. Il existe un réel manque d'une base de données belges suffisamment complète.

Ensuite, l'ensemble des logiciels d'ACV sont des "Black Box". Cela signifie que l'utilisateur n'a pas le contrôle des différentes méthodes de calculs réalisées en interne. Les logiciels ne sont pas suffisamment transparents.

L'objectif de cette recherche n'est donc pas possible à atteindre sans résoudre les problématiques des outils d'ACV disponibles sur le marché.

PRINCIPALES RÉFÉRENCES

Guide Bâtiment Durable. (2020, octobre 29). Les déclarations environnementales de produits (EPD). <https://www.guidebatimentdurable.brussels/declarations-environnementales-produits-epd>
ISO (International Standardization Organization). (2006a). International Standard ISO 14040. Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework.