

Travail de Fin d'Etudes : 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

Auteur : Bodmer, Martin

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10728>

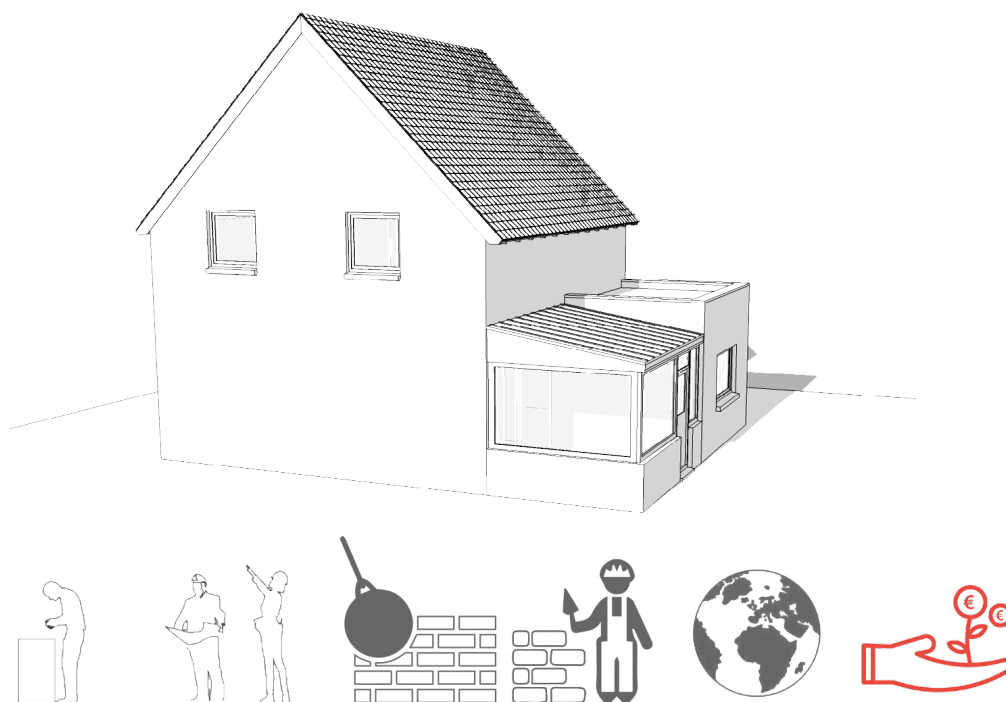
Avertissement à l'attention des usagers :

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.

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'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil Architecte par **Martin BODMER**

Promoteur : Professeur Shady ATTIA

Jury : Sigrid REUTER, Guirec RUELLAN

Année académique 2019 - 2020

Résumé

La rénovation des logements existants est une excellente opportunité de réduire l'impact environnemental du secteur de la construction. Pour mener des campagnes de rénovation à large échelle dans le futur, il est impératif de les élaborer en amont, dès aujourd'hui, afin qu'elles soient réellement durables.

Dans cette étude, l'analyse du cycle de vie (ACV) et le coût du cycle de vie (CCV) permettent de déterminer les matériaux et techniques de rénovation les plus pertinents du point de vue environnemental et financier. Cette approche se base sur la méthodologie MMG développée dans le cadre de l'outil belge TOTEM. Les résultats environnementaux sont exprimés en valeur monétaire grâce à la monétisation.

Le cas d'étude de ce travail est une maison quatre façades unifamiliale datant de 1960, peu performante, et représentative du stock bâti belge. Des entretiens avec des producteurs de matériaux écologiques wallons et des entrepreneurs en construction ont permis de dégager plusieurs pistes de rénovation. Les différentes parties de l'enveloppe du bâtiment sont étudiées de façon indépendante, puis les résultats sont assemblés pour construire trois scénarios de rénovation de l'ensemble du bâtiment.

Les résultats mettent en évidence que l'impact des matériaux sur le bilan environnemental après rénovation varie de 30 à 45%. Les économies environnementales sont d'environ 80% pour tous les scénarios par rapport à la situation existante. Elles sont si conséquentes qu'elles relativisent l'importance du choix des matériaux. Le critère le plus déterminant est le coût des travaux. L'investissement semble peu rentable du point de vue économique. Au final, ce qui importe le plus est de rénover coûte que coûte, pour faire baisser l'impact environnemental de l'énergie opérationnelle, indépendamment de la technique utilisée pour cela.

Néanmoins, les résultats montrent qu'il est possible de rénover à bas coût tout en réduisant l'impact environnemental. Une configuration idéale est atteinte avec : une post-isolation des murs creux avec des fibres de laine de verre et un panneau de polystyrène enduit en façade, une insufflation d'ouate de cellulose en toiture et l'installation de châssis bois double vitrage.

Abstract

Building energy retrofitting is an excellent opportunity to reduce the environmental impact of the construction sector. In order to carry out large-scale renovation campaigns in the future, it is imperative to develop them upstream, today, so that they are truly sustainable.

In this study, Life Cycle Analysis (LCA) and Life Cycle Costs (LCC) are used to determine the most environmentally and financially relevant renovation materials and techniques. This approach is based on the MMG methodology developed within the framework of the Belgian tool TOTEM. The environmental results are expressed in monetary value through monetisation.

The case study for this work is a single-family detached house dating from 1960, which is not very efficient, and representative of the Belgian built stock. Interviews with Walloon producers of ecological materials and building contractors identified several avenues for renovation. The different parts of the building envelope are studied independently of each other, then the results are put together to construct three scenarios for the renovation of the entire building.

The results show that the impact of materials, through embodied energy, on the environmental balance sheet after renovation varies from 30 to 45%. The environmental savings are around 80% for all scenarios compared to the existing situation. They are so substantial that they put the importance of the choice of materials into perspective. The most decisive criterion is the retrofit investment cost. The investment does not seem to be profitable from an economic point of view. In the end, the most important thing is to renovate at all costs to reduce the environmental impact of operational energy, regardless of the technique used for this.

Nevertheless, the results show that it is possible to renovate at low cost while reducing the environmental impact. An ideal configuration is achieved with a post-insulation of the cavity walls with fiberglass wool and a coated polystyrene panel on the facade, an insufflation of cellulose wadding into the roof and the installation of double-glazed wooden frames.

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon promoteur M. Shady ATTIA pour son suivi régulier, son accompagnement tout au long de ce travail et les ressources mises à ma disposition. Je remercie également les membres de mon jury, Mme. Sigrid REITER et M. Guirec RUELLAN dont les travaux académiques dans le domaine de la rénovation ont inspiré le choix de mon sujet.

Je remercie particulièrement toutes les entreprises qui m'ont ouvert leurs portes le temps d'une demi-journée : Mme. Caroline Lorenzen pour ISOCELL GMBH, M. Baptiste De Mahieu pour ISOHEMP, M. Christian Roggeman et M. Florian Grosjean pour Grammitherm EUROPE SA.

Ainsi que les entrepreneurs en construction qui m'ont consacré de leur temps malgré un agenda très chargé : M. Nicolas Beaujean pour Econsience, M. Michel Saint-Georges pour Energie-SaGe, M. Nicolas Cloos pour AdVitampierre et M. Henri Adam pour Waleco.

Pour terminer, je remercie les membres de ma famille, ma compagne, et Jeanne Olléon pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce projet, ainsi que pour leur aide précieuse lors de la retranscription de mes entretiens.

Table des matières

1	Introduction	14
1.1	Responsabilité du secteur de la construction et engagements	14
1.2	Les enjeux de la rénovation	15
1.3	L'analyse de cycle de vie dans la rénovation	17
1.4	Intérêt du coût du cycle de vie	18
1.5	Méthodologie et différentes parties de l'étude	20
2	Etat de l'Art	23
2.1	Analyse du cycle de vie	23
2.1.1	Définition	23
2.1.2	Fonctionnement	24
2.1.3	Limitations	25
2.2	Analyse du cycle de vie dans la construction en Belgique avec TOTEM	27
2.2.1	Dès la conception	27
2.2.2	Présentation de TOTEM	27
2.2.3	Méthodologie et niveau d'analyse	29
2.2.4	Objectifs et champ d'étude	30
2.2.4.1	But	30
2.2.4.2	Unité fonctionnelle	30
2.2.4.3	Durée de vie	30
2.2.5	Frontières du système	30
2.2.5.1	Production A1-3	31
2.2.5.2	Construction A4-5	31
2.2.5.3	Utilisation B1-7	32
2.2.5.4	Fin de vie C1-4	33
2.2.6	Inventaire du cycle de vie	33
2.2.6.1	Base de données	33
2.2.7	Impact du cycle de vie	33
2.2.7.1	Catégories d'impact et indicateurs	33
2.2.7.2	Monétarisation et score unique agrégé	35

2.2.8	Le programme B-EPD	36
2.3	Coût du cycle de vie	37
2.3.1	Définition	37
2.3.2	Fonctionnement	37
2.3.3	Coût du cycle de vie à l'échelle du bâtiment	38
2.4	Analyse et coût du cycle de vie dans la rénovation - Etudes similaires	39
2.4.1	Vilches, Garcia-Martinez et al. (2016)	39
2.4.2	Pombo, Allacker et al. (2016)	40
3	Méthodologie	42
3.1	Sujet et questions de recherche	42
3.2	Processus du mémoire	42
3.3	Choix des logiciels	44
3.4	Récolte et traitement des données	46
3.5	Hypothèses générales et limites de l'étude	46
3.6	Hypothèses de l'analyse et du coût du cycle de vie	48
3.7	Hypothèses du coût du cycle de vie	50
3.8	Moyens de compléter cette étude	50
4	Sélection du cas d'étude	51
4.1	Sélection d'une typologie	51
4.2	Présentation du cas d'étude	52
4.2.1	Origine du cas d'étude	52
4.2.2	Détails de l'Archétype A	53
4.2.3	Adaptation de l'Archétype A aux besoins de l'étude	56
5	Présentation des scénarios de rénovation	60
5.1	Rénovation des murs extérieurs	60
5.1.1	Considérations générales	60
5.1.2	Scénario murs 1 Polystyrène insufflé + Panneaux de polystyrène + Enduit	63
5.1.3	Scénario murs 2 Laine de verre insufflée KNAUF Supafil + Panneaux polyuréthane + Enduit . . .	64
5.1.4	Scénario murs 3 Liège expansé en vrac + Panneaux de liège + Enduit	65
5.1.5	Scénario murs 4 Ossature bois + Cellulose insufflée ISOCELL + Bardage bois	66
5.1.6	Scénario murs 5 Ossature bois + Laine de verre + Bardage fibro-ciment	67
5.1.7	Scénario murs 6 Panneaux EPS + Enduit	68

5.2	Rénovation de la toiture	69
5.2.1	Considérations générales	69
5.2.2	Scénario toiture 1	
	Laine de verre 20+20cm	71
5.2.3	Scénario toiture 2	
	Laine de roche 20+20cm	73
5.2.4	Scénario toiture 3	
	Cellulose insufflée ISOCELL 40cm	75
5.2.5	Scénario toiture 4	
	Laine de bois STEICOflex 20+20cm	77
5.2.6	Scénario toiture 5	
	Laine de chanvre 20+20cm	79
5.2.7	Scénario toiture 6	
	Isolant en herbe de prairie GRAMMITHERM 20+20cm	81
5.3	Remplacement des fenêtres	83
5.3.1	Considérations générales	83
5.3.2	Scénario fenêtres 1	
	Châssis bois + Double vitrage	84
5.3.3	Scénario fenêtres 2	
	Châssis aluminium + Double vitrage	85
5.3.4	Scénario fenêtres 3	
	Châssis PVC + Triple vitrage	86
6	Résultats - Rénovation des murs extérieurs	87
6.1	Résultats des scénarios de rénovation	87
6.1.1	Résultats de l'analyse du cycle de vie	87
6.1.2	Résultats du coût du cycle de vie	91
6.2	Comparaison avec la situation existante	93
6.3	Analyse de sensibilité sur la durée de vie	96
7	Résultats - Rénovation de la toiture	101
7.1	Résultats des scénarios de rénovation	101
7.1.1	Résultats de l'analyse du cycle de vie	101
7.1.2	Résultats du coût du cycle de vie	105
7.2	Comparaison avec la situation existante	107
7.3	Analyse de sensibilité sur la durée de vie	110
8	Résultats - Remplacement des fenêtres	115
8.1	Résultats des scénarios de rénovation	115
8.1.1	Résultats de l'analyse du cycle de vie	115
8.1.2	Résultats du coût du cycle de vie	119

8.2	Comparaison avec la situation existante	121
8.3	Analyse de sensibilité sur la durée de vie	123
9	Analyse comparative au niveau du bâtiment	128
9.1	Sélection des scénarios de bâtiment	128
9.2	Comparaison des scénarios de bâtiment	129
10	Discussion	135
11	Conclusions	141
12	Bibliographie	145

Table des figures

1.1	Consommation d'énergie finale par secteur dans l'Europe des 28	14
1.2	Répartition de la consommation d'énergie par secteur et par vecteur en Wallonie en 2017	15
1.3	Evolution du taux de permis de nouvelles constructions et de rénovation en Belgique par année	16
1.4	Structure du mémoire	22
2.1	Les différentes phases d'une analyse du cycle de vie (ACV)	25
2.2	Aperçu de la plateforme en ligne de TOTEM	28
2.3	Les différents niveaux d'analyse de la méthodologie de TOTEM	29
2.4	Phases du cycle de vie du bâtiment selon la norme européenne EN 15978 (CEN)	31
3.1	Processus du mémoire	43
3.2	Logiciels AutoCAD 2015 et SketchUp 2015	44
3.3	TOTEM - Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials.	45
3.4	Logiciel Microsoft Excel 2013	46
4.1	Croisement entre le type et l'époque de construction des logements	52
4.2	Photos du cas d'étude Archétype A	55
4.3	Composition des parois du cas d'étude Archétype A	57
4.4	Aperçu du modèle 3D de l'Archétype A adapté aux besoins de l'étude	58
4.5	Aperçu du modèle 3D de l'Archétype A adapté aux besoins de l'étude	59
5.1	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 1	63
5.2	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 2	64
5.3	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 3	65
5.4	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 4	66
5.5	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 5	67
5.6	Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 6	68
5.7	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 1	71
5.8	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 2	73
5.9	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 3	75

5.10	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 4	77
5.11	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 5	79
5.12	Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 6	81
5.13	Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 1	84
5.14	Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 2	85
5.15	Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 3	86
6.1	Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation des murs	88
6.2	Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénarios de rénovation des murs	89
6.3	Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation des murs	90
6.4	Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation des murs	91
6.5	Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation des murs . . .	92
6.6	Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation des murs	93
6.7	Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs	94
6.8	Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs	95
6.9	Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs	96
6.10	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	97
6.11	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	97
6.12	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	98
6.13	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	99
6.14	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	99
6.15	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	100
7.1	Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation de la toiture	102
7.2	Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénarios de rénovation de la toiture	103

7.3	Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation de la toiture	104
7.4	Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation de la toiture	105
7.5	Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation de la toiture	106
7.6	Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation de la toiture	107
7.7	Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture	108
7.8	Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture	109
7.9	Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture	110
7.10	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	111
7.11	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	111
7.12	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	112
7.13	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	113
7.14	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	113
7.15	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	114
8.1	Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de remplacement des fenêtres	116
8.2	Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénarios de remplacement des fenêtres	117
8.3	Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de remplacement des fenêtres	118
8.4	Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de remplacement des fenêtres	119
8.5	Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de remplacement des fenêtres	120
8.6	Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de remplacement des fenêtres	120
8.7	Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de remplacement des fenêtres	121
8.8	Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de remplacement des fenêtres	122

8.9	Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de remplacement des fenêtres	123
8.10	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	124
8.11	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	124
8.12	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans	125
8.13	Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	126
8.14	Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	126
8.15	Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans	127
9.1	Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	130
9.2	Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	131
9.3	Coût environnemental par type de paroi pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	132
9.4	Coût financier par type de paroi pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment .	132
9.5	Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	133
9.6	Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	133

Liste des tableaux

2.1	Facteurs de monétarisation pour chaque indicateur d'impact	35
3.1	PEB : valeurs U maximales en application à partir du 1er janvier 2017.	48
4.1	Conductivité thermique des parois existantes de l'Archétype A	54
4.2	Composition du mur existant de l'Archétype A	54
4.3	Surface des parois de l'Archétype A adaptés aux besoins de l'étude	56
5.1	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 1	63
5.2	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 2	64
5.3	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 3	65
5.4	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 4	66
5.5	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 5	67
5.6	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 6	68
5.7	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 1	72
5.8	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 2	74
5.9	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 1	76
5.10	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 4	78
5.11	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 5	80
5.12	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 6	82
5.13	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 1	84
5.14	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 2	85
5.15	Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 3	86
6.1	Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de murs	94
6.2	Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de murs	95
7.1	Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de la toiture	108
7.2	Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de la toiture	109
8.1	Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de remplacement des fenêtres	121

8.2	Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de remplacement des fenêtres	122
9.1	Composition des parois pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment	129
9.2	Coût environnemental des scénarios de rénovation à l'échelle du bâtiment exprimé en € par m ² de SPB	134

1.1 Responsabilité du secteur de la construction et engagements

Le secteur de la construction est responsable d'un pourcentage important des émissions de CO₂, de l'épuisement des ressources et de la production de déchets au niveau mondial. En Europe, le monde du bâtiment représente 40% de la consommation d'énergie et 36% des émissions de gaz à effet de serre. 75% des bâtiments sont considérés comme énergétiquement inefficaces (European commission : energy department 2020). La Figure 1.1 montre que la dépense d'énergie totale pour le chauffage des logements est supérieure à celle de l'industrie en Europe (Eurostat 2019, chiffres de l'année 2016-2017).

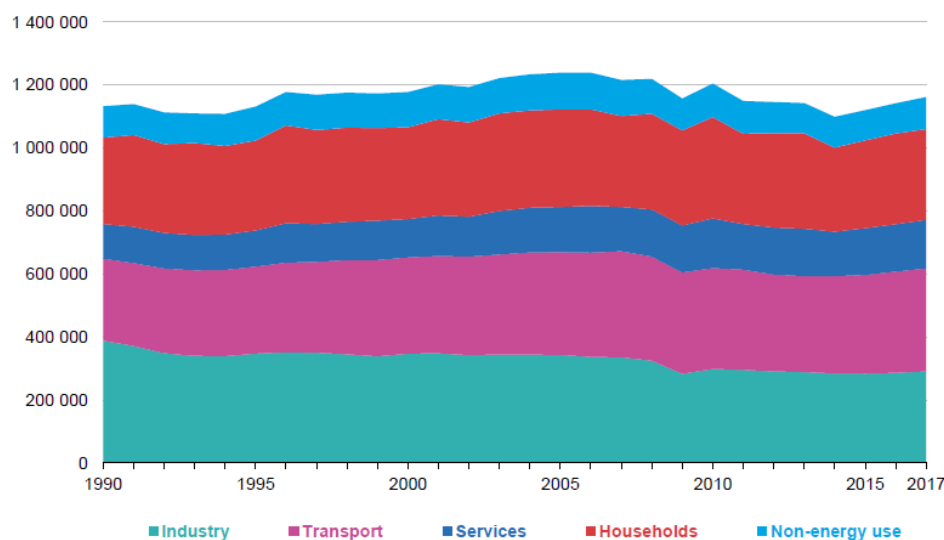


FIGURE 1.1 – Consommation d'énergie finale par secteur dans l'Europe des 28.
Exprimée en kToe (kilotonne de pétrole équivalent) = environ 11.63 GWh
Sources : Eurostat 2019, Energy balance sheets 2017

Pour pallier à ce gouffre énergétique, l'Europe a mis en place des objectifs contraignants pour les états membres. Si ceux-ci sont en passe d'être atteints à l'horizon 2020 (Worsdosfer 2018), ils deviennent de

plus en plus ambitieux au fur et à mesure des années. Réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% à l'Horizon 2030. Puis 60% en 2040 et 80% en 2050 (European commission 2014).

Depuis 2018, la Wallonie retranscrit ses objectifs européens au travers du "Plan Wallon Energie-Climat 2030". En matière d'efficacité énergétique, ce plan vise à atteindre en 2030 une baisse de 77% de la consommation d'énergie par rapport à 2005. Les secteurs les plus concernés sont l'industrie, le transport et le bâtiment, les trois secteurs les plus énergivores comme vu sur la Figure 1.2. Les mesures réglementaires se renforcent d'année en année pour atteindre le niveau d'exigence Q-ZEN (quasi-zéro énergie) pour tous les bâtiments neufs à partir de 2021. La Wallonie vise à la neutralité carbone dans les constructions neuves à partir de 2027. Pour le résidentiel, l'objectif est de rénover les logements existants pour atteindre en 2050 le niveau PEB A ($E_{spec} < 85 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$) en moyenne sur l'ensemble du stock bâti (SPW Energie 2019).

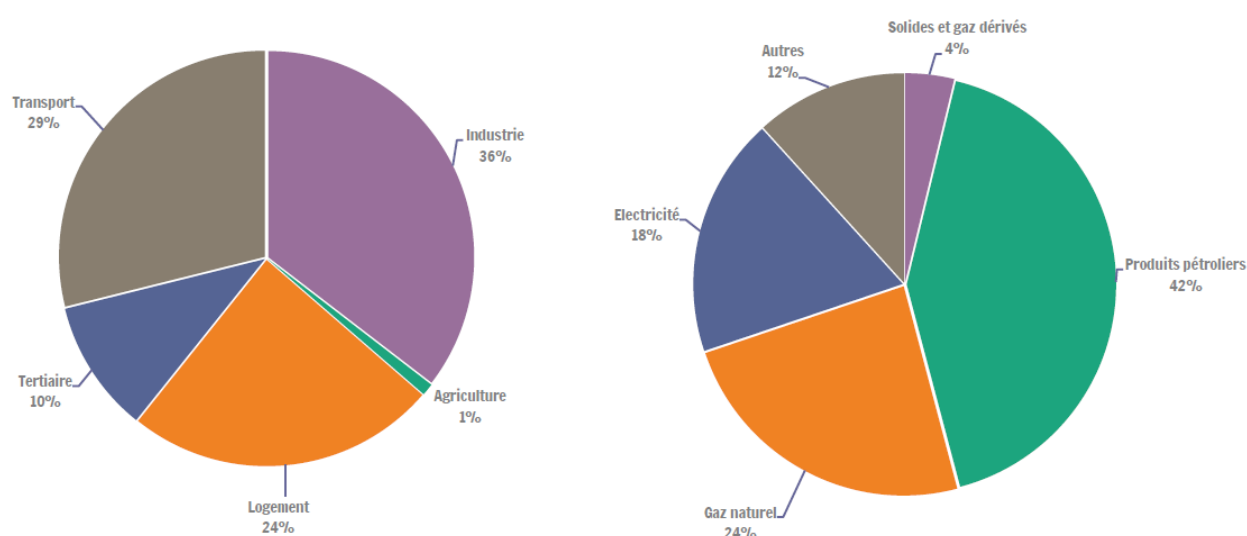


FIGURE 1.2 – Répartition de la consommation d'énergie par secteur et par vecteur en Wallonie en 2017. Sources : SPW, DGO4, DEBD, ICEDD, données novembre 2019; Calculs : IWEPS

Aujourd'hui, ces objectifs sont loin d'être atteints. Il est donc impensable d'imaginer sereinement que des objectifs plus ambitieux seront atteints dans les prochaines années. En 2008, la consommation moyenne d'une habitation wallonne pour le chauffage était de $161 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$. Le chauffage représente à ce jour environ 75% de la consommation totale d'un logement (Dgo4 2014).

1.2 Les enjeux de la rénovation

Ces performances énergétiques insatisfaisantes peuvent s'expliquer au regard des dernières enquêtes sur la caractérisation du stock bâti wallon. Notre parc de logement est globalement ancien. Près de 30% des habitations ont été construites avant 1919, 50% avant 1945, et 75% avant 1980 (DGO4 2014). Il a été construit à une époque où le coût de l'énergie était faible, ce qui explique que les logements wallons

soient si mal isolés. Lors de son enquête sur le stock bâti en 2014, la DGO4 a recensé que près de 40% des toitures des bâtiments résidentiels ne sont absolument pas isolées. Par ailleurs, l'inadéquation entre le stock bâti et les constitutions familiales qui tendent à diminuer s'accroît. Cela engendre une sous-occupation des logements et donc une consommation d'énergie accrue par habitant. (Kints 2008) (DGO4 2014).

Ce parc de logement serait très fortement améliorable à condition de s'en donner les moyens politiques. C'est un gisement potentiel d'économies d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre considérable, "facilement" et rapidement mobilisable (Kints 2008). Certes, les difficultés à surmonter sont nombreuses : coût du financement des travaux pour les particuliers, considérations patrimoniales, stock bâti hétéroclite, etc (Kints 2008). Mais la prise de conscience progresse. La mise en oeuvre de la rénovation énergétique à une large échelle est un challenge qu'il est urgent de relever. Le résultat sera très positif aussi bien au niveau économique que social. Cette "grande transition" pourrait entraîner la création de deux millions d'emplois en Europe (Mlecnik, Kondratenko 2012).

Pourtant dans les faits, on constate que ce n'est pas la stratégie suivie. La majorité des mesures gouvernementales se concentre actuellement sur les constructions neuves. La réglementation PEB est renforcée d'année en année pour atteindre à terme le niveau N-ZEB (Attia, Mlecnik 2012). Un grand nombre d'études cherchent à démontrer l'utilité de la construction de nouveaux logements très performants comme les maisons passives (Mlecnik, Hilderson 2011). Une des causes probable pourrait être le caractère moins "prestigieux" de la rénovation comparé à la construction neuve (Ruellan 2016).

Or le secteur du bâtiment se caractérise par une durée de vie importante et une lenteur de l'évolution de ses caractéristiques. Nous vivons dans les logements du siècle dernier (Hens, Verbeeck 2001). Au regard de l'évolution du nombre de permis déposés (Figure 1.3), on constate que le taux de nouvelles constructions, bien que très performantes, est bien trop faible pour permettre le renouvellement du stock bâti énergétiquement déficient d'ici à 2030 et même 2050. De plus, le taux de renouvellement était d'initialement d'environ +1%/an, mais il faiblit ces dernières années.

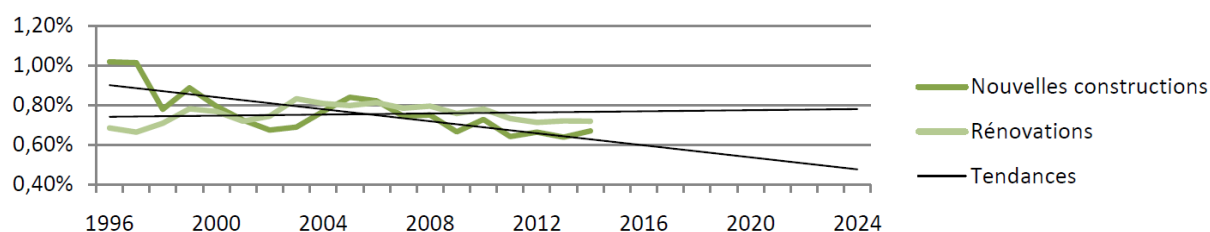


FIGURE 1.3 – Evolution du taux de permis de nouvelles constructions et de rénovation en Belgique par année. Sources : Ruellan 2016, Etat du marché de la rénovation du bâti résidentiel en Belgique (d'après les données de la Direction générale Statistique et Information économique, 2015)

Poursuivre la recherche de la perfection énergétique (N-ZEB, maison passive, etc) dans les nouvelles constructions en ignorant le reste du problème n'est pas une stratégie adaptée. Le vrai défi consiste donc

en la rénovation des bâtiments existants. C'est à ce niveau que le potentiel d'amélioration est le plus conséquent.

"By focusing only on new building is like chasing a mosquito and avoiding the elephant."

(Attia, Mlecnik 2012)

1.3 L'analyse de cycle de vie dans la rénovation

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un procédé normalisé permettant d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un système ou d'une activité tout au long de son cycle de vie. Pour ce faire, elle quantifie les flux de matière et d'énergie entrant et sortant du système ainsi que les émissions associées (Allacker 2010). Son usage se généralise dans le secteur du bâtiment car, non seulement elle met en évidence les émissions de CO₂ généré par la construction, mais également de nombreux autres types d'impacts environnementaux tel que : la consommation de ressources renouvelable et non-renouvelable, le rejet de polluants, la production de déchets, les effets sur la santé humaine, etc.

Dans le bâtiment, elle est particulièrement indiquée pour mettre en évidence les relations entre les deux sources d'impact environnemental majeures, à savoir : la consommation d'énergie opérationnelle (chauffage, électricité, etc) et l'énergie intrinsèque aux matériaux, aussi appelée énergie grise (utilisée pour extraire, transformer, transporter et mettre en oeuvre les matériaux) (Verbeeck, Hens 2010). Ce rapport se situe généralement aux alentours d'une consommation d'énergie opérationnelle de 90% par rapport à une énergie grise de 9% (Dubois, Allacker 2015). Historiquement, l'énergie grise a longtemps été considérée comme négligeable dans le bilan total (Anderson, Moncaster 2020). Mais avec l'amélioration des performances énergétiques du bâtiment (en construction neuve et en rénovation), ce rapport tend à s'équilibrer voir même à s'inverser pour les bâtiments à très faible consommation d'énergie. (Verbeeck, Hens 2010). L'énergie grise peut alors représenter de 35 à 60% de l'énergie totale consommée par le bâtiment tout au long de son cycle de vie (Attia 2018).

Dans le cas de la rénovation cela peut se comprendre aisément : la consommation d'énergie opérationnelle diminue car on réduit les pertes de chaleur de l'enveloppe. L'énergie grise des matériaux elle par contre, augmente proportionnellement à la mise en oeuvre des nouveaux matériaux lors des travaux de rénovation. De plus, les isolants tel que les mousses issues de la pétrochimie, ou le verre cellulaire, possèdent donc une énergie grise très élevée et un impact environnemental désastreux (Attia 2018). Si, dans l'absolu, la consommation d'énergie tend à diminuer grâce aux meilleures performances de l'enveloppe, les travaux de rénovation en eux-mêmes entraînent inversement une consommation d'énergie accrue pour produire les matériaux et un impact environnemental non négligeable.

Une étude du bâtiment dans sa globalité au travers d'une analyse du cycle de vie permet alors de palier à ce problème en perfectionnant la démarche de rénovation. En concevant différents scénarios variant

les matériaux et les techniques, il est possible de déterminer les solutions les plus avantageuses afin de minimiser l'impact environnemental des travaux. C'est un champ d'étude totalement nouveau. Les analyses du cycle de vie dans le domaine du bâtiment se concentrent sur le marché du neuf qui comme expliqué précédemment, ne résoudra pas le problème. Il existe peu d'études sur l'analyse du cycle de vie dans la rénovation à l'heure actuelle. Et la plupart d'entre elles ont pour objectif principal de mettre en évidence les économies d'énergie réalisées entre la situation existante et l'état final (Vilches, 2016). Plusieurs experts s'accordent ainsi à dire que la rénovation en Belgique manque d'une vision à long terme (Wijnants, Allacker 2015).

Or, si l'on souhaite mener des campagnes de rénovation à large échelle, il est impératif de les penser en amont afin qu'elles soient réellement durables. Pour cela, il est nécessaire de développer une approche scientifique afin d'identifier les pistes de rénovation les plus pertinentes et les typologies de bâtiments prioritaires sur notre territoire. Si en plus, il est possible de les rénover grâce à des matériaux écologiques, le bilan environnemental des travaux sera réduit. Et par conséquent le gain sera double. Les techniques de rénovations durables existent déjà (Mlecnik, Cré, Kondratenko 2011) (CSTC 2012), mais elles nécessitent une meilleure connaissance de leurs caractéristiques et une meilleure diffusion, aussi bien dans les milieux professionnels qu'auprès du grand public.

Une fois cela accompli, il sera possible de concevoir et de développer des méthodes de rénovation durables systématiques pour une typologie donnée. Voire de mettre en place une logique d'industrialisation de la rénovation, comme cherche à le faire l'initiative néerlandaise "EnergieSprong". Cette approche a déjà permis de rénover plus de 5000 logements sociaux aux Pays-Bas grâce à des modules de façade et de toiture préfabriqués en atelier. L'homogénéité du stock bâti néerlandais facilite cette logique d'industrialisation. L'assemblage sur site dure en général de 1 à 7 jours (EnergieSprong 2018). Si ce genre de démarche se poursuit, elle permettra une nette augmentation du taux de rénovation annuel. C'est dans cet objectif à long terme que s'inscrit ce travail.

1.4 Intérêt du coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie (CCV) est une méthode permettant d'évaluer les coûts engendrés tout au long du cycle de vie d'un produit : coûts initiaux et coûts opérationnels à venir. Tout en prenant en compte des facteurs économiques décrivant l'évolution des prix sur la période de temps considérée. Le but est d'optimiser les performances et de réduire les coûts d'un produit, et ce dans l'intérêt du propriétaire. Elle est de plus en plus couramment utilisée en parallèle d'une analyse de cycle de vie, tout particulièrement dans le secteur du bâtiment (Allacker 2010) (Ratna Reddy 2015).

La comparaison entre analyse du cycle de vie et coût du cycle de vie montre bien souvent à quel point les enjeux environnementaux et économiques ne se rejoignent pas (Ruellan 2016) (Allacker, De Troyer 2013) (Mlecnik, Hilderson 2011). Il existe de multiples freins d'origine économiques à la rénovation :

Le premier d'entre eux est le prix de l'énergie, qui même s'il est en augmentation ces dernières années, reste trop faible et trop volatile que pour inciter à réaliser des économies d'énergie grâce à la rénovation (DGO4 2012). L'externalisation d'une grande partie des coûts de l'énergie, en particulier celle des combustibles fossiles, n'incite pas à faire des efforts (Ruellan 2016). Une des meilleures manières pour augmenter le taux de rénovation serait encore d'augmenter artificiellement le prix de l'énergie grâce à la taxation, décision que l'état contrôle (DGO4 2012). Cependant, d'un point de vue social, cela pourrait s'avérer dramatique. Cette mesure serait à coup sûr très décriée, comme on a pu le voir lors du mouvement des gilets jaunes. Cette critique est tout à fait valable car beaucoup de personnes sont déjà en situation de précarité énergétique (Mlecnik, Kondratenko 2012) (DGO4 2012) et cela ne ferait qu'accroître leur stress économique.

La prise décision de rénovation a lieu au niveau du particulier. Or, si bien des études montrent que rénover est rentable sur le long terme (Mlecnik 2010). Le coût des travaux reste un frein important pour le particulier car l'investissement est important et le temps de retour sur investissement est incertain (Mlecnik, Cré 2011) (DGO4 2012). Le manque de culture économique et la précarité pousseront souvent le particulier à préférer étaler les dépenses dans le temps en payant plus cher sa facture d'énergie mensuelle plutôt que de déboursier une somme importante immédiatement afin de faire des économies dans le futur (Baveye, Valenduc 2011). Il est observé que les particuliers qui investissent le plus sont souvent ceux qui possèdent le plus de moyens financiers, et dont le logement est déjà très performant, ce sont en réalité ceux qui en ont le moins besoin ! (Mlecnik, Hilderson 2011)

Il existe des aides, primes et avantages fiscaux à la rénovation qui peuvent être un outil intéressant pour inciter le particulier à franchir le pas. Se pose encore la question de la communication de la part des autorités sur celles-ci et de leur adéquation avec les enjeux environnementaux. Ainsi, octroyer des subsides pour une rénovation mineure qui ne permet que de diminuer faiblement la consommation est totalement contre-productif. Car personne ne viendra rénover l'habitation une seconde fois par la suite (Dubois, Allacker 2015).

Enfin, rénover n'est pas toujours possible et avantageux d'un point de vue économique. Nul ne voudrait injecter de l'argent pour acquérir un bien énergétiquement médiocre, aménagé selon les standards du siècle dernier et sans qualité patrimoniale, si il peut pour le même prix bâtir une maison neuve correspondant à ses goûts. Dans ce cas, il peut être préférable de mettre en place des opérations de démolition/reconstruction (Verhoeven 2009). Encore faudrait-il mettre en place des instruments adaptés, telle qu'une taxation sur les terrains vierges, afin d'encourager ce procédé (Dubois, Allacker 2015).

En conséquence, puisque l'impératif économique et l'enjeu environnemental ne concordent pas encore actuellement, il est important de déterminer un optimum entre investissement initial et performance énergétique recherchée. Une performance élevée coûtera plus cher lors de l'investissement initial mais réduira d'autant la consommation et permettra de faire des économies sur les factures d'énergie. Au final, il convient donc de calculer la durée du retour sur investissement afin de le raccourcir au maximum. D'où l'utilité d'identifier les pistes prioritaires de rénovation, les matériaux et techniques qui ont le plus

d'impact positif d'un point de vue environnemental, tout en étant les plus compétitifs et légers pour le portefeuille du particulier. C'est ce que je me propose de faire dans le cadre de ce travail.

1.5 Méthodologie et différentes parties de l'étude

Le propos développé dans les sections précédentes est à la base du choix de mon sujet de mémoire : "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". Il cherchera à répondre aux trois questions suivantes :

- "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 ?"

Cette question de recherche est un préalable indispensable pour la conception et le développement de méthodes de rénovation systématiques grâce, entre autres, à l'industrialisation et la préfabrication. Elles permettraient de diminuer les coûts des travaux, d'en réduire la durée et de faciliter l'intervention sur chantier, afin d'augmenter significativement le taux de rénovation du stock bâti existant.

J'ai sélectionné un cas d'étude : une maison aux performances énergétiques médiocres, sans aucun intérêt patrimonial donc plus simple à rénover, issue de la typologie "maison quatre façades construite en Belgique entre 1945 et 1969". Sur base d'informations recueillies dans la littérature et auprès d'entreprises wallonnes actives dans la rénovation, j'ai choisi ensuite des matériaux et techniques appropriées et élaboré différents scénarios de rénovations pour chacune des parois du bâtiment :

- L'isolation à posteriori de la toiture
- L'isolation à posteriori des murs
- Le remplacement des châssis et portes existantes

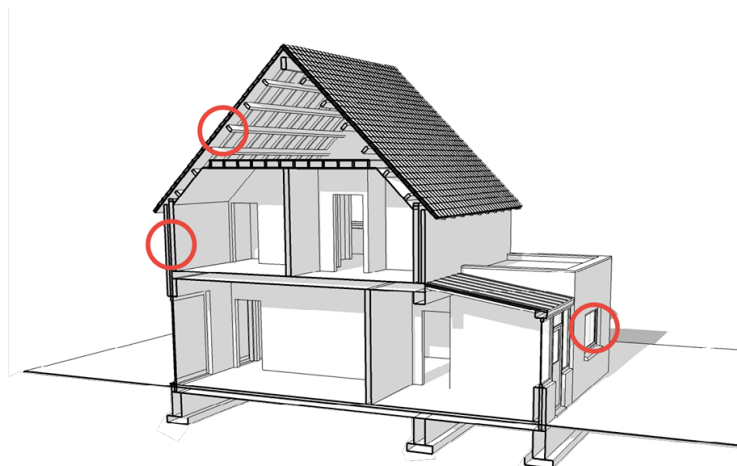
Après obtention des résultats de l'analyse et du coût du cycle de vie au niveau des parois, je les ai assemblés pour concevoir les scénarios de rénovation les plus pertinents du point de vue financier et environnemental. Enfin, l'analyse comparative de ces scénarios permet de réaliser des observations et d'en déduire des conclusions pour répondre à la question de recherche.

Ce rapport de recherche est composé de trois parties :

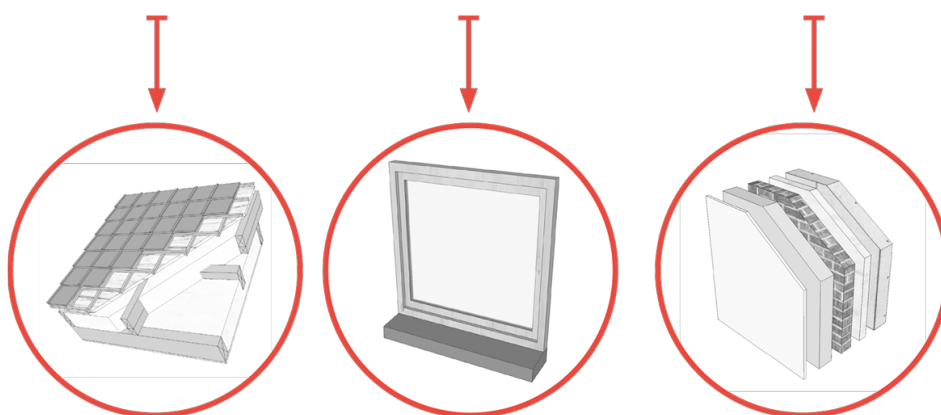
Une partie théorique : composée de la présente introduction détaillant la problématique du travail et d'un état de l'art sur différents sujets : définition des concepts d'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie, intégration de l'analyse de cycle de vie dans la construction en Wallonie et enfin une revue de littérature sur des études similaires ayant recours à l'analyse et au coût du cycle de vie dans la rénovation des logements.

Une partie pratique : explication de la méthodologie du travail et des hypothèses considérées, la sélection du cas d'étude, l'élaboration des scénarios au niveau des parois et les calculs de l'analyse et du coût du cycle de vie correspondants.

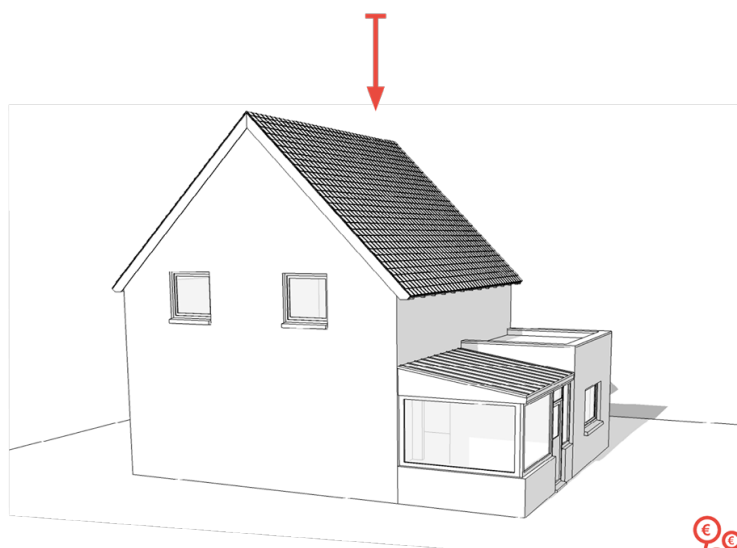
Une partie analytique : discussion des résultats obtenus, assemblage des parois pour créer les scénarios au niveau du bâtiment, et analyse comparative de ceux-ci pour répondre à la question de recherche.



CHOIX DES MATERIAUX & TECHNIQUES



SCENARIOS RENOVATION PAROIS



SCENARIOS RENOVATION BATIMENT

FIGURE 1.4 – Structure du mémoire

2.1 Analyse du cycle de vie

2.1.1 Définition

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée d'évaluation de l'impact environnemental d'un produit, d'un système ou d'une activité tout au long de son cycle de vie, *from Cradle-to-Grave* (du berceau à la tombe). Elle comprend toutes les étapes consécutives depuis l'extraction des ressources, en passant par la transformation et l'utilisation, jusqu'à la fin de vie, avec éventuellement le recyclage (Allacker 2010). Le standard ISO 14040 la définit comme : un processus de compilation et de quantification des flux de matière et d'énergie, entrant et sortant du système considéré, et des impacts environnementaux potentiels qui y sont associés, tout au long du cycle de vie (ISO 2006).

Là où bien souvent, la durabilité d'un produit est évaluée en se focalisant uniquement sur la consommation d'énergie et sur les émissions de CO₂, l'analyse de cycle de vie va bien plus loin. Elle met en avant un aperçu global du spectre environnemental : rejet de polluants divers, consommation de ressources renouvelables et non-renouvelables, utilisation des sols, production de déchets, effets sur la santé humaine, etc.

Cette méthode est à l'origine développée pour l'industrie dans les années 1980. Mais le manque de transparence, de coordination et son utilisation à des fins de promotion environnementale trompeuse ont conduit à sa normalisation dans les années 1990. Depuis, elle est de plus en plus utilisée dans le monde de la recherche (Buyle 2013).

Il est important de noter que l'analyse du cycle de vie n'évalue que l'impact potentiel et non pas l'impact réel, ces résultats sont donc à prendre comme une indication et non pas comme une valeur prédictive (Allacker 2010). Cependant les résultats obtenus sont suffisamment pertinents pour permettre de comparer différents produits ou systèmes entre eux et de juger de leur durabilité au regard des indicateurs environnementaux retenus.

2.1.2 Fonctionnement

L'analyse du cycle de vie n'obéit pas à une méthode unique, son cadre est libre et flexible (ISO 2006). Toutefois en pratique, le déroulement de celle-ci suit en général le standard développé par la norme ISO 14040 et ses dépendances. Il est composé de quatre étapes itératives décrites ci-dessous et sur la Figure 2.1 (Buyle 2013) (Allacker 2010) (ISO 2006) :

- **Définition du but et du champ de l'étude** : une analyse de cycle de vie débute par la définition du but et des objectifs de l'étude. Ensuite, vient la description du champ d'étude : fonction à assurer pour le système étudié, choix de l'unité fonctionnelle, flux de références et frontières du système. Pour des raisons de transparence, il est important de définir à l'avance le public cible de l'étude et les applications prévues pour les résultats.
- **Inventaire du cycle de vie** : en premier lieu vient la récolte des données, leur vérification et leur traitement. Ensuite, le système et les processus à l'oeuvre dans celui-ci sont étudiés pour permettre d'opter pour un mode opératoire de calcul quantifiant les entrées/sorties. En effet, dans le cas de systèmes multi-fonctionnels, il en existe plusieurs : la subdivision (individualiser le processus et exclure le reste), l'expansion (ajouter des fonctions à un système pour le comparer à un autre) et la distribution (partitionner les entrées/sorties entre les co-produits sur base de critères) (Delvenne 2016). L'inventaire du cycle de vie est un processus itératif. A mesure que les données sont récoltées et que le système est mieux connu, il est souvent nécessaire d'adapter les hypothèses posées précédemment et de revoir la façon de collecter les données (ISO 2006).
- **Évaluation des impacts** : la quantification de l'impact environnemental se base sur l'inventaire. Elle s'effectue en trois étapes : la sélection des catégories d'impact environnemental et des indicateurs en fonction des buts et objectifs définis au préalable. Puis, c'est la classification, elle attribue les données de l'inventaire aux catégories d'impact. Enfin, vient la caractérisation : le calcul des résultats exprimés grâce aux indicateurs de catégorie (ISO 2006). Il existe également deux étapes optionnelles : la normalisation et la pondération. La normalisation ne sera pas étudiée dans ce mémoire. La pondération permet de convertir les résultats obtenus dans les différentes catégories d'impact pour les exprimer sous la forme d'un score global (Allacker 2010). Par exemple, la monétarisation est une forme de pondération qui permet de mettre en évidence le coût des externalités négatives engendrées par le système étudié.
- **Interprétation des résultats** : cette dernière étape consiste à analyser les résultats. Ceux-ci sont résumés et discutés pour en dégager des conclusions permettant d'aboutir à une prise de décision conforme aux objectifs de départ (ISO 2006).

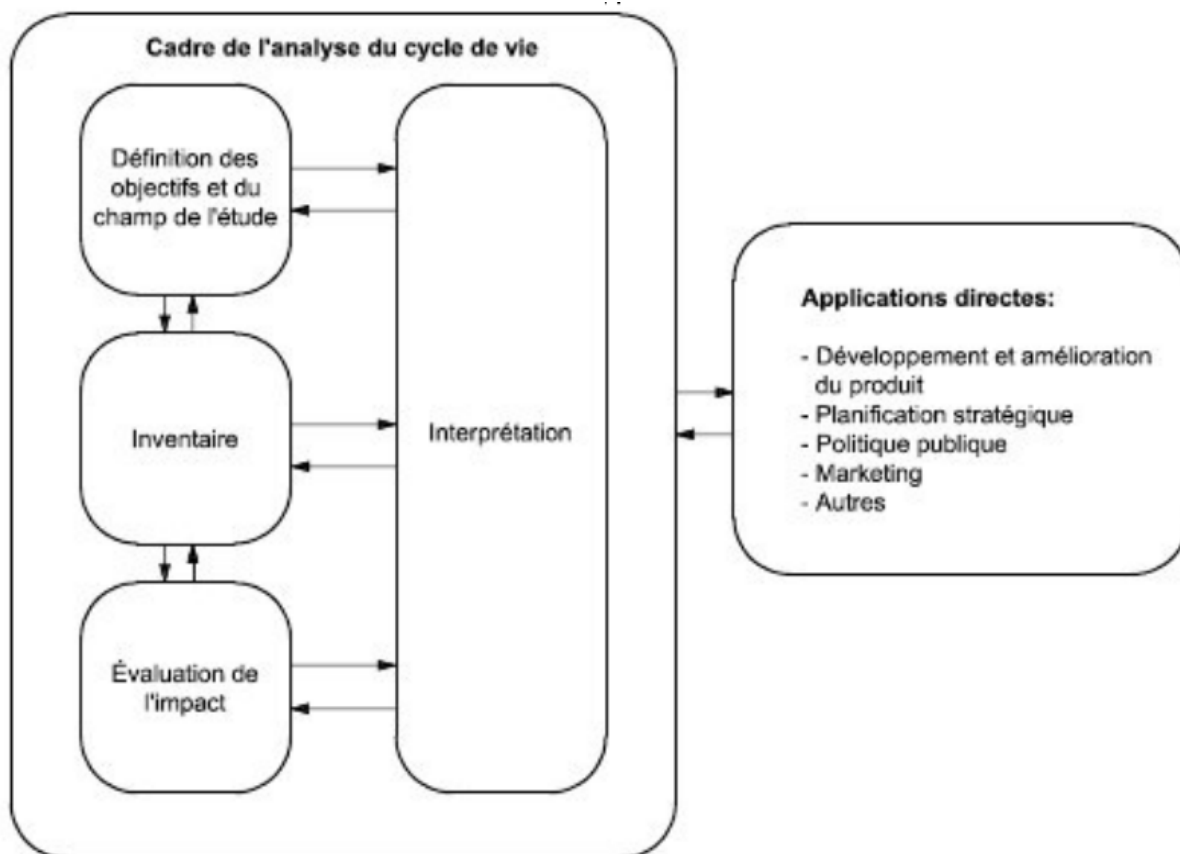


FIGURE 2.1 – Les différentes phases d’une analyse du cycle de vie (ACV). Sources : ISO 14040 (2006) Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework

2.1.3 Limitations

Les principales limites de l’analyse du cycle de vie concernent leur comparabilité et leur reproductibilité (Vilches 2016). Les résultats de deux études distinctes sont rarement directement comparables du fait de la variabilité entre ces deux études dans le choix des hypothèses de départ : unités fonctionnelles, frontières du système, etc. De plus, lors de la seconde étape, le choix de la méthode d’inventaire conditionne l’affectation des émissions aux différentes catégories d’impacts. En fonction de la méthode choisie, cela peut entraîner des erreurs d’attribution voire des omissions (Vilches 2016). C’est pourquoi des méthodes différentes appliquées à un même cas d’étude peuvent aboutir à des résultats assez différents (Buyle 2013). Il faut donc manier ces résultats avec précaution car ils n’ont de sens que dans un certain cadre en fonction des hypothèses choisies.

Le grand nombre d’hypothèses, de simplifications par rapport à la réalité et l’incertitude quant à la qualité des données peuvent entraîner un écart conséquent des résultats par rapport à la réalité (Vuarnoz, Hoxha 2020). Pour cette raison, il faut réaliser systématiquement une analyse de sensibilité. En faisant varier les paramètres et hypothèses de l’analyse du cycle de vie, elle estime l’amplitude des effets de ceux-ci sur les résultats (ISO 2006).

De plus, l'analyse du cycle vie exprime l'impact environnemental de façon globalisée, à l'échelle de la planète entière. Elle ne tient pas compte des effets que peuvent engendrer l'émission de polluants au niveau local, à cause de leur importante concentration en un endroit donné ou de la vulnérabilité du milieu local (Buyle 2013).

En conclusion, l'analyse du cycle de vie est un outil offrant une vision globale et exhaustive des impacts environnementaux. Elle est suffisante pour prendre des décisions, à condition de rester conscient de ses propres limitations.

2.2 Analyse du cycle de vie dans la construction en Belgique avec TOTEM

2.2.1 Dès la conception

Pour poursuivre les objectifs européens de réductions des émissions à l'horizon 2030, la Wallonie renforce d'année en année la réglementation sur les performances énergétiques des bâtiments (PEB). De nouveaux standards de construction se développent pour répondre à ces exigences et réaliser des économies d'énergie. Cela entraîne un besoin accru en matériaux et installations techniques, qui tendent peu à peu à devenir prépondérants dans le bilan environnemental total.

En tant qu'architecte, si l'on souhaite poursuivre ces économies, il nous faut revoir notre façon de concevoir les bâtiments pour réduire l'impact environnemental des matériaux. C'est en effet au stade de la conception que l'on fixe les grandes lignes du projet qui ne changeront plus par la suite : la volumétrie, la structure porteuse, le choix des matériaux, etc. Ces choix architecturaux conditionnent donc totalement l'impact environnemental du futur projet. L'analyse du cycle de vie permet alors de quantifier cet impact afin d'éclairer les concepteurs sur les conséquences environnementales de leurs choix.

Toutefois, l'analyse du cycle de vie au niveau du bâtiment est difficile à réaliser pour un professionnel de la construction qui n'est pas familier avec le concept. Le très grand nombre d'hypothèses concernant : la durée de vie importante et incertaine (50 à 100 ans en moyenne), le grand nombre de composants et leur remplacement tout au long de la phase opérationnelle, la qualité de la mise en oeuvre et les performances qui en résultent, le comportement des occupants, etc. engendre une incertitude et une crédibilité des résultats plus faible.

La standardisation de la méthodologie de l'analyse de cycle de vie du bâtiment est une façon de répondre à ses lacunes. C'est également un moyen pour développer des outils à destination des acteurs du monde de la construction, facilitant la réalisation de bilans environnementaux des bâtiments.

2.2.2 Présentation de TOTEM

TOTEM, pour "Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials", est un outil belge d'évaluation de l'impact environnemental des bâtiments à destination des acteurs du monde de la construction. Relativement récent, il a été lancé en Février 2018 à l'occasion du salon Batibouw. Il est le résultat d'une collaboration active entre les trois régions au travers de l'OVAM (Flandres), le SPW (Wallonie) et Bruxelles-Environnement. Cinq années de recherches et de concertation avec le secteur de la construction, les universités et les bureaux d'études ont été nécessaires pour mettre au point un outil scientifique, exhaustif et adapté aux spécificités du contexte belge.

Pour réduire l'impact environnemental du bâtiment, il est essentiel de développer une connaissance pointue des performances environnementales des matériaux. Or bien souvent, les développeurs de projet ne sont pas encore conscients des conséquences environnementales de leurs choix de conception. Ils manquent d'informations lorsqu'il s'agit d'identifier et de sélectionner objectivement des matériaux

écologiques pour leur projet. TOTEM est une réponse à ces deux problèmes.

Premièrement, il fournit un outil, clé en main, pour réaliser une évaluation quantitative du potentiel d'impact environnemental des matériaux d'un projet dès la phase de conception. Cette évaluation se base sur une analyse du cycle de vie au niveau du bâtiment.

Deuxièmement, il met à disposition les informations environnementales, pour chaque matériau individuellement, grâce à sa banque de données en ligne. L'objectif est de stimuler la créativité des concepteurs et d'encourager le choix d'éco-matériaux pour réaliser des projets répondant aux exigences environnementales de demain.

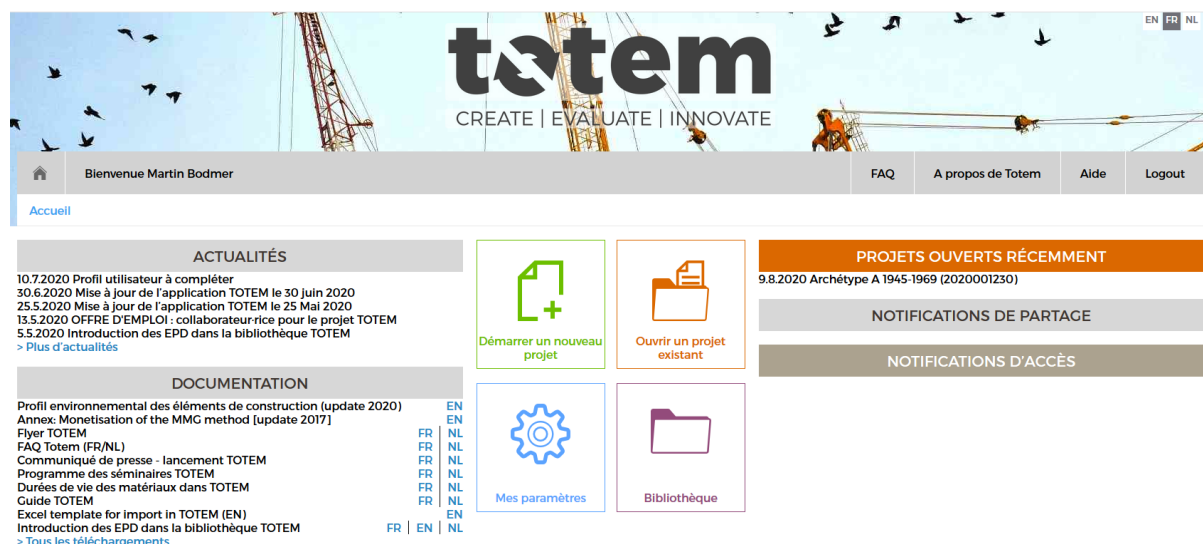


FIGURE 2.2 – Aperçu de la plateforme en ligne de TOTEM. Sources : www.totem-building.be

En pratique, TOTEM est une plateforme digitale accessible en ligne gratuitement à l'adresse : www.totem-building.be (Figure 2.2). Après inscription, le concepteur est invité à créer un nouveau projet et à encoder les informations de celui-ci : surface de plancher, volume, nombres d'occupants, etc. Il peut ensuite parcourir la vaste bibliothèque, contenant actuellement près de 950 matériaux et 450 éléments de construction, pour les importer dans son projet. Les matériaux sélectionnés s'assemblent en éléments, puis les éléments sous forme de parois, et les parois constituent le bâtiment. TOTEM permet alors de calculer le coût environnemental des externalités négatives exprimé en €/m² de surface du bâtiment. Il génère un rapport détaillant :

- L'impact environnemental des matériaux versus de l'énergie opérationnel.
- L'impact par catégorie grâce aux indicateurs environnementaux.
- L'impact par étape du cycle de vie.
- L'impact par composant du bâtiment.

Il est alors possible d'analyser l'impact des choix de conception et de les optimiser. TOTEM propose de réaliser plusieurs versions d'un même projet avec des matériaux différents. Il est alors possible d'opter

pour le projet qui possède le bilan environnemental le plus intéressant. TOTEM offre donc une aide à la décision pour effectuer des choix architecturaux et de matériaux dès la phase de conception.

2.2.3 Méthodologie et niveau d'analyse

TOTEM est construit sur base du cadre méthodologique MMG développé depuis 2011 par l'OVAM en collaboration avec VITO et la KULeuven. Le cadre méthodologique MMG propose une méthode pour évaluer, quantifier et communiquer sur les performances environnementales des matériaux et des éléments de construction. Ce modèle se veut transparent, adapté au contexte belge et évolue en fonction des avancées dans le domaine. Le cadre d'évaluation de MMG est aligné sur les standards européens proposés par le CEN (Centre Européen de Normalisation). L'ensemble de normes CEN/TC 350 régit l'analyse du cycle de vie pour les matériaux et les bâtiments. Par exemple :

- EN 15804 :2012 propose un groupe d'indicateurs environnementaux et les méthodes d'attribution d'impact correspondantes.
- EN 15978 définit les frontières du système en divisant le cycle de vie du bâtiment en modules.

Le cadre méthodologique MMG suit en grande partie les recommandations de CEN/TC 350 mais s'en éloigne parfois ou propose des améliorations comme nous le verrons par la suite.

La méthodologie est structurée de façon hiérarchique et modulaire en quatre niveaux d'analyse :

- Matériau (briques, isolant, etc).
- Matériau mis en oeuvre (mur en maçonnerie, isolant en toiture placé entre chevrons, etc).
- Élément de construction (parois entière).
- Bâtiment (assemblage de parois).

Chaque niveau est basé sur le précédent (Figure 2.3). En effet, en simplifiant, un bâtiment peut se résumer à la somme de ses parois, qui elles-mêmes possèdent une composition précise, de matériaux agencés entre eux. TOTEM dispose d'une bibliothèque pour les trois premiers niveaux : matériaux, matériaux mis en oeuvre et éléments de construction. Pour certains matériaux, il est possible de modifier quelques paramètres tels que l'épaisseur, la valeur U, etc. L'évaluation de l'impact environnemental n'est pas possible au niveau du matériau en tant que tel, mais bien pour les niveaux supérieurs. De façon individuelle pour chaque matériau mis en oeuvre ou élément de construction, et à l'échelle globale en considérant le bâtiment dans son ensemble.

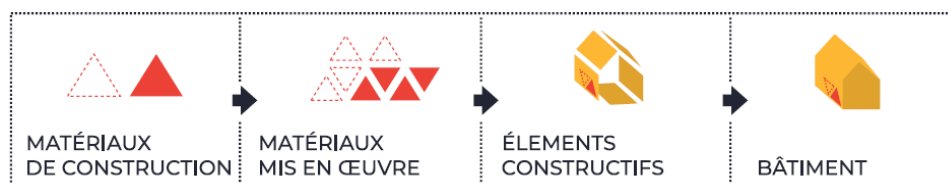


FIGURE 2.3 – Les différents niveaux d'analyse de la méthodologie de TOTEM. Sources : OVAM, SPW, Bruxelles Environnement 2018 "Guide TOTEM".

2.2.4 Objectifs et champ d'étude

2.2.4.1 But

L'objectif est de quantifier l'impact environnemental des éléments de construction et des bâtiments en l'exprimant de deux façons : grâce aux indicateurs classiques et sous la forme d'un score agrégé grâce à la pondération. Cela permet une meilleure compréhension des performances des matériaux utilisés en Belgique et facilitera la prise de décisions sur le choix de matériaux écologiques par les concepteurs.

2.2.4.2 Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle (UF) utilisée dans TOTEM est le m^2 d'un élément sur toute la durée de vie du bâtiment, estimée à 60 ans. Mais son usage varie en fonction du niveau d'analyse auquel on se situe. Par exemple, pour des murs extérieurs ou intérieurs, l'UF sera le m^2 de paroi verticale. Mais à l'échelle du bâtiment entier, ce sera le m^2 de surface au sol. Cette approche a comme avantage principal de permettre l'évaluation à tous les niveaux d'analyse présentés précédemment, de façon individuelle, sans avoir à concevoir et à quantifier l'impact pour un bâtiment entier. Par contre, certains impacts ne peuvent être considérés qu'à l'échelle du bâtiment dans son ensemble, comme par exemple les pertes thermiques par ventilation qui ne peuvent être imputées à aucun élément constructif en particulier.

Au final, l'impact au niveau du bâtiment entier est obtenu en additionnant l'impact attribué à chacun des composants, plus les pertes par ventilation à l'échelle du bâtiment. Il est divisé par la surface de plancher brute (SPB) exprimée en m^2 . La valeur obtenue est alors utilisable pour comparer l'impact environnemental de bâtiments différents entre eux, à condition qu'ils remplissent le même type de fonction pour que la comparaison ait un sens.

2.2.4.3 Durée de vie

La durée de vie du bâtiment dans TOTEM est fixée par défaut à 60 ans et n'est malheureusement pas modifiable dans le logiciel actuellement. Le choix de cette valeur se base sur la littérature scientifique. L'hypothèse retenue est qu'après 60 ans, la majorité des composants du bâtiment, à l'exception de la structure, devront être remplacés lors d'une rénovation conséquente.

2.2.5 Frontières du système

Les frontières du système déterminent quels sont les processus pris en compte dans l'évaluation. Conformément à la norme EN 15978, les différentes phases du cycle de vie du bâtiment sont organisées sous la forme de modules aux frontières clairement définies (Figure 2.4). Sauf hypothèses contraires, on considère en général que l'impact environnemental est attribué à la phase lors de laquelle il se produit. On ne détaillera pas ici le module qui traite du recyclage car celui-ci n'est pas encore intégré dans TOTEM.

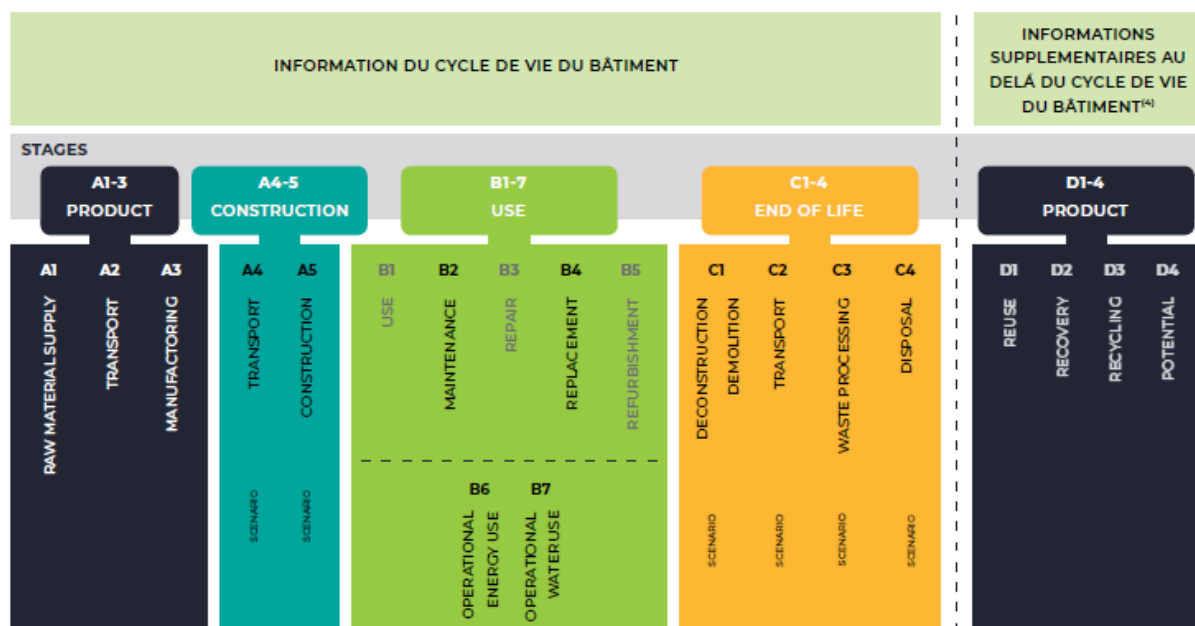


FIGURE 2.4 – Phases du cycle de vie du bâtiment selon la norme européenne EN 15978 (CEN). Sources : OVAM, SPW, Bruxelles Environnement 2018 "Guide TOTEM".

2.2.5.1 Production A1-3

La phase de production couvre l'extraction des matières premières, leur acheminement jusqu'à l'usine et leur transformation en produit fini. C'est donc une approche *Cradle-to-Gate*.

A1 - Extraction : comprend l'extraction de ressources minières dans le cas des minéraux et des métaux.

La culture dans le cas de ressources d'origine végétale (matériaux bio-sourcés). Ou encore la réutilisation de matériaux issus du recyclage.

A2 - Transport : couvre l'acheminement des matières premières jusqu'au site de transformation. Pour un certain nombre de matériaux importés, TOTEM prévoit des scénarios de transport spécifiques.

A3 - Transformation : comprend l'ensemble des processus de fabrication des matériaux, y compris les emballages. Les ressources et l'énergie consommés, les émissions et déchets rejetés sont comptabilisés.

TOTEM prévoit la possibilité d'indiquer si un matériau est neuf ou existant (matériau issu du réemploi ou matériau conservé en rénovation). Dans ce second cas, seule la phase d'utilisation est comptabilisée.

2.2.5.2 Construction A4-5

La phase de construction couvre le transport des matériaux depuis l'usine jusqu'au chantier et leur mise en oeuvre.

A4 - Transport : TOTEM estime les émissions dues au transport sur base de scénarios de transport spécifiques à la Belgique. Ceux-ci tiennent compte de la localisation des usines, du type de véhicule,

du taux de chargement et de la distance. Le logiciel n'intègre pas le transport des équipements de chantier (grues, etc).

A5 - Construction : comprend l'énergie pour la mise en oeuvre en elle-même et les déchets générés sur site (chutes, surplus, etc). La quantité de déchets est très variable selon les chantiers et matériaux et donc difficile à évaluer. TOTEM considère 5% de pertes forfaitaires.

2.2.5.3 Utilisation B1-7

La phase d'utilisation commence dès la réception du bâtiment jusqu'à sa démolition. C'est de loin la phase la plus longue, et aussi la plus incertaine puisque qu'elle dépend du comportement des occupants. Elle couvre tous les impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie et d'eau tout au long de la durée de vie et le remplacement des équipements. Actuellement seuls les modules B4 et B6 sont intégrés dans TOTEM.

B4 - Remplacement : TOTEM considère le remplacement des matériaux et équipements qui ont une durée de vie plus courte que la durée de vie totale de 60 ans (châssis de fenêtre, finitions intérieures, etc). Mais pas l'impact qu'engendrerait une rénovation complète.

B6 - Consommation d'énergie opérationnelle : n'est pris en compte que la consommation d'énergie de chauffage (qui représente environ 75% de la consommation (Dgo4 2014)). La consommation d'énergie est évaluée directement dans TOTEM en comptabilisant les pertes par transmissions des parois et les pertes par ventilation (uniquement à l'échelle du bâtiment entier). Les pertes par transmission sont déterminées grâce à la méthode des degrés-jours équivalents détaillée dans l'équation 2.1 (adaptée de OVAM 2020). L'impact environnemental correspondant est ensuite obtenu grâce à un coefficient de la base de données Ecoinvent tenant compte du mix énergétique belge. L'impact environnemental de la consommation d'énergie du bâtiment au cours de cette phase est additionné à celui des matériaux pour obtenir le bilan total, mais il est exprimé séparément afin de toujours pouvoir comparer l'impact des matériaux versus impact de l'énergie opérationnelle.

$$P_{transmis} = \frac{U_{par} \cdot A_{par} \cdot DJ_{eq}}{n_{distrib} \cdot n_{emiss} \cdot n_{contr}} \quad (2.1)$$

Avec :

- I_{env} pertes annuelles par transmission de la paroi (en kWh.an)
- U_{par} la valeur U de conductivité thermique de la paroi (en W/m².K)
- A_{par} l'aire de la paroi (en m²)
- DJ_{eq} le nombre de degrés jours équivalents = 1200 (Allacker 2010). Multiplié par (24.60.60)/106 pour convertir les joules en mégajoules et les jours en secondes.
- $n_{distrib}$ coefficient d'efficacité de distribution = 0.95
- n_{emiss} coefficient d'efficacité d'émission = 0.96
- n_{contr} coefficient d'efficacité de contrôle du système de chauffe = 0.94

2.2.5.4 Fin de vie C1-4

La phase de fin de vie survient dès que le bâtiment est déclaré hors-service et ne sera plus utilisé. Il est dès lors considéré comme une source de matériaux et d'éléments qui doivent être transportés et traités de différentes façons selon leur type : élimination, récupération, recyclage ou réemploi.

C1 - Démolition : comprend l'énergie pour les opérations mécaniques de démolition et l'émissions de polluants (particules) des matériaux détruits.

C2 - Transport : transport depuis le chantier jusqu'au point de collecte et de tri. TOTEM considère une distance moyenne à l'échelle de la Belgique.

C3 - Traitement pour réutilisation : concerne la consommation d'énergie des procédés industriels utilisés pour le tri et la transformation des déchets en de nouvelles matières premières destinées à être réutilisées.

C4 - Traitement final : TOTEM considère différents scénarios de traitement final en fonction de la nature des déchets et des façons de faire du secteur belge : incinération, mise en décharge, etc.

2.2.6 Inventaire du cycle de vie

L'inventaire comptabilise pour chacun des modules détaillés précédemment l'ensemble des flux de matières et d'énergie entrant et sortant du système.

2.2.6.1 Base de données

TOTEM utilise actuellement des données génériques pour réaliser l'inventaire. Elles proviennent de "Ecoinvent 3.3", une base de données suisse reconnue dans le monde scientifique, très complète, transparente et régulièrement mise à jour. Les données sont harmonisées avec le contexte belge en adaptant les données de la phase de production et de transport sur base des pratiques industrielles des entreprises de matériaux locales. Elles tiennent aussi compte du mix énergétique de notre pays.

A terme, le but est de se passer d'Ecoinvent et d'utiliser la base de données fédérale belge B-EPD regroupant les EPD (environmental product declaration) des entreprises belges de matériaux. Nous parlerons plus longuement de B-EPD dans la section 2.2.8 à la page 36. Leur intégration dans TOTEM est prévue pour mi-2020.

2.2.7 Impact du cycle de vie

Lors de cet étape, conformément à la norme ISO 14040 et ses dépendances, chaque donnée de l'inventaire du cycle de vie est associée à une catégorie d'impact environnemental et exprimée avec l'indicateur correspondant.

2.2.7.1 Catégories d'impact et indicateurs

TOTEM s'inspire des recommandations européennes en la matière et a retenu deux groupes d'indicateurs pour exprimer l'impact environnemental des matériaux de la façon la plus complète possible. Il

s'agit des groupes d'indicateurs CEN et CEN +.

L'utilisation du premier groupe CEN dans l'analyse du cycle de vie des bâtiments est préconisée par la norme EN 15804 :2012. Ce groupe reprend les sept catégories d'impact les plus couramment utilisées et les indicateurs correspondants :

- **Réchauffement climatique** (kg CO₂ équivalent) : émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, CFC, HFC, etc) qui participent au réchauffement climatique lié à l'activité humaine.
- **Appauvrissement de la couche d'ozone** (kg CFC-11 équivalent) : émissions de gaz qui contribuent à dégrader la couche d'ozone (CFC, HFC, etc).
- **Acidification des sols et de l'eau** (kg SO₂ équivalent) : émissions de gaz provoquant des pluies acides (NO₂, SO₂, etc).
- **Eutrophisation** (kg (PO₄)₃₋ équivalent) : émissions dans l'air et dans l'eau d'engrais et fertilisant qui finissent dans les cours d'eau, étangs, etc et entraînent un développement excessif d'algues étouffant le reste de la biodiversité aquatique.
- **Formation d'ozone photochimique** (kg éthylène équivalent) : émissions de gaz conduisant à la production d'ozone de basse altitude sous l'action des UV (smog).
- **Épuisement des ressources abiotiques : éléments** (kg antimoine Sb équivalent) : raréfaction des matières premières non-renouvelables d'origine minérale (fer, cuivre, zinc, argent, etc).
- **Épuisement des ressources abiotiques : combustibles fossiles** (Mégajoule) : raréfaction des combustibles d'origine fossile (pétrole, gaz naturel et charbon).

Le second groupe d'indicateurs CEN + permet d'aborder d'autres types d'impact environnementaux et offrir une vision plus large tel que voulu par les trois régions. Nous ne les détaillerons pas ici car ils ne seront pas utilisés dans le cadre de ce travail.

- **Toxicité humaine** (DALY = années de vie perdue)
- **Particules fines** (DALY)
- **Rayonnement ionisant** (DALY)
- **Ecotoxicité pour les écosystèmes d'eau douce** (kg DB)
- **Occupation des sols** (déficit en C, m² x an)
- **Transformation du sol** (déficit en C, m²)
- **Épuisement de l'eau** (m³)

Après réalisation des calculs sur base de l'inventaire, on obtient un score environnemental pour chacun des indicateurs, exprimé dans son unité spécifique. L'ensemble de ces résultats offre une vision complète de l'impact des matériaux et du bâtiment tout au long du cycle de vie.

2.2.7.2 Monétarisation et score unique agrégé

Le but de TOTEM est de fournir un outil de décision pour les concepteurs, afin de leur permettre d'identifier et de sélectionner des matériaux écologiques en toute objectivité. Or, la multitude des résultats obtenus précédemment, exprimés chacun dans leur unité spécifique, peut rendre complexe l'interprétation. TOTEM propose donc de les convertir et d'utiliser une seule et même unité pour exprimer les résultats. Cela simplifie grandement la comparaison entre indicateurs distincts. Au final, TOTEM exprime l'impact environnemental sous deux formes : score séparé pour chaque indicateur et score global obtenu en additionnant les résultats de chaque indicateur.

En pratique, pour convertir les résultats, on a recours à l'étape facultative de pondération de l'analyse du cycle de vie dont nous avons parlé dans le chapitre précédent. Dans TOTEM, cette pondération se fait sur une base monétaire, en considérant le coût des externalités négatives. C'est-à-dire, le coût des dégâts environnementaux pesant sur la société. C'est ce qu'on appelle la monétarisation. Les résultats pour chaque catégorie d'impact sont multipliés par un facteur de monétarisation spécifique à chacune d'entre elle. Par exemple : l'impact de 1 kg de CO₂ équivalent multiplié par un facteur de 0.05 €/kg est égal à un coût environnemental de 0.05 €. Au final, on obtient donc une mesure de l'impact environnemental exprimé en €/m² (de parois ou de SPB du bâtiment selon le niveau d'analyse où l'on se situe).

Indicateurs d'impact	Unité	Fact. monétaire (€)
Réchauffement climatique	kg CO ₂ eq	0.05
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11 eq	49.1
Acidification des sols et de l'eau	kg SO ₂ eq	0.43
Eutrophisation	kg (PO ₄) ₃₋ eq	20
Formation d'ozone photochimique	kg éthyl. eq	0.48
Épuisement des ressources : éléments	kg Sb eq	1.56
Épuisement des ressources : combustibles fossiles	MJ	0

TABLE 2.1 – Facteurs de monétarisation pour chaque indicateur d'impact.

Source : OVAM (2017) "Annex : Monetisation of the MMG method", d'après les travaux de Debacker et al. (2012)

Ces facteurs de monétarisation sont repris dans le tableau 2.1. Ils proviennent de l'étude menée par l'OVAM (actualisée en 2017) et sont basés sur les travaux de Debacker et al. (2012). En fonction des indicateurs, ces facteurs sont obtenus sur base de la méthode des coûts des dommages ou des coûts de prévention. Déterminer ces facteurs est assez complexe : comment estimer ce que coûte un dégât environnemental pour la société ? Ces coûts sont incertains et variables. Ils dépendent du contexte local, des choix politiques, etc. Une même émission de polluant ne causera pas les mêmes nuisances en fonction du milieu naturel environnant, du contexte socio-économiques, de l'exposition des personnes à ces rejets, etc. Ces facteurs ont été sélectionnés pour rendre compte du contexte en Europe occidentale.

Il est important de comprendre que le coût de ces externalités négatives n'est pas inclus dans les prix courants. Ces coûts sont directement répercutés sur la société. Elle paye pour les dégâts engendrés par d'autres agents économiques, sans compensation financière de leur part (assurance santé pour des maladies liés à la pollution, destruction de la biodiversité entraînant un appauvrissement des terres et une baisse des récoltes, changement climatique, etc).

Grâce à la pondération et l'expression de l'impact sous une forme monétaire, les coûts des externalités peuvent tout à fait être comparés aux coûts réels classiques. C'est d'ailleurs le principal intérêt de cette méthode de pondération (Allacker 2010). Cela permet de se rendre compte du poids que font peser certaines décisions sur l'ensemble de la société. Comme nous le verrons dans la suite de ce travail, il est même possible de calculer le coût total en additionnant les coûts environnementaux aux coûts du cycle de vie (coûts de construction et coûts opérationnels). Comme si l'on appliquait le principe "pollueur-payeur". Bien souvent, les solutions qui semblaient les plus économiques deviennent subitement moins attrayantes.

2.2.8 Le programme B-EPD

La déclaration environnementale de produit (EPD) est une fiche d'information dans laquelle un producteur de matériaux renseigne les données environnementales quantitatives de son produit. Elle doit obligatoirement être réalisée sur base d'une analyse du cycle de vie et répondre au standard ISO 14040. Concises et simples à appréhender, elles se destinent aux concepteurs et acteurs du monde de la construction afin de faciliter le choix de matériaux durables et écologiques (Buyle 2013).

Le programme belge B-EPD, mené par le SPF santé publique, a été lancé en 2016 et a pour objectif d'instaurer un cadre en fixant les normes et règles à suivre pour les entreprises belges souhaitant réaliser une EPD de leur produit. Après réalisation de l'EPD par un organisme indépendant, les industriels déposent leurs fiches EPD auprès du SPF qui effectue une série de vérification. Elles sont ensuite intégrées dans la base de données fédérale B-EPD disponible sur le site du SPF santé publique et mise à disposition du grand public. C'est une démarche obligatoire pour toute entreprise souhaitant apposer un message à caractère environnemental sur son produit, et ce afin d'éviter le green-washing.

La base de données B-EPD sera prochainement intégrée dans TOTEM en remplacement des données génériques de Ecoinvent afin que les concepteurs disposent directement des données environnementales des entreprises produisant ou commercialisant des produits de construction en Belgique. Cette intégration est prévue pour mi-2020. Cependant, en ce début de mois d'Août 2020, il n'y avait que 9 EPD disponibles sur la base de données B-EPD. Il est donc nécessaire de trouver des incitants pour encourager les industriels à passer le cap.

2.3 Coût du cycle de vie

2.3.1 Définition

Le coût du cycle de vie (CCV) est une méthode d'évaluation des coûts financiers sur toute la durée de vie d'un produit (Allacker 2010). Contrairement aux outils économiques classiques, le coût du cycle de vie évalue non seulement les coûts d'investissements initiaux mais aussi les coûts opérationnels tout au long du cycle de vie. Cependant, il ne tient pas compte des coûts environnementaux (Gluch, Baumann 2004). Le coût du cycle de vie intègre l'évolution des prix dans le futur grâce aux facteurs économiques d'actualisation présents dans les calculs. Le déroulement d'une analyse du coût du cycle de vie est détaillée dans la norme ISO 15686-5 (Pombo, Allacker 2018).

Le coût du cycle de vie est à l'origine un outil micro-économique, à vocation financière uniquement, servant à réaliser des études de rentabilité et de faisabilité, et dont l'usage se généralise depuis 25-30 ans (Ratna-Reddy 2015). Il permet d'optimiser les coûts et de comparer entre eux des produits et systèmes tout au long de leur cycle de vie (Gluch, Baumann 2004) (Allacker 2010) (Delvenne 2016). Il peut être utilisé à n'importe quelle phase du projet, mais son recours est particulièrement justifié en phase de conception afin de prendre les meilleures décisions d'investissement possibles.

Bien qu'à l'origine ce ne soit pas sa fonction, il est de plus en plus utilisé conjointement à une analyse de cycle de vie dans le domaine de la construction. Car c'est l'outil idéal si l'on souhaite réaliser une évaluation intégrée, c'est-à-dire à la fois des coûts financiers et de l'impact environnemental (Allacker 2010). L'analyse du coût du cycle de vie est rendue complexe du fait du grand nombre de données nécessaires, de la qualité variable de celles-ci et des nombreuses hypothèses posées quant à l'évolution des prix dans le futur (Ratna-Reddy 2015).

2.3.2 Fonctionnement

Les coûts initiaux sont relativement aisés à déterminer puisque immédiats. Par contre, les coûts opérationnels surviendront dans le futur. L'analyse doit donc tenir compte du facteur temporel et associer à chaque prix un profil de son évolution au cours des années à venir. Ces coûts futurs sont ensuite convertis en valeur actuelle pour pouvoir comparer, sur la même base, le coût du cycle de vie des différentes alternatives.

La valeur actuelle nette VAN est définie comme étant la somme d'argent nécessaire que l'on doit posséder dès aujourd'hui, avant de se lancer dans le projet, afin de disposer de la somme d'argent nécessaire pour répondre aux coûts futurs à la date donnée à laquelle ils sont censés se produire (Allacker 2010). En économie, on distingue généralement deux façons de présenter les coûts : la valeur nominale, qui ne corrige pas l'impact de l'inflation (prix courants), et la valeur réelle, qui elle la corrige (prix constants). La VAN sera exprimée ici en valeur nominale.

Au final, la valeur actuelle nette VAN peut se déduire au moyen de l'équation 2.2 (adaptée de Allacker 2010).

$$VAN = \sum_{t=0}^n C_t \cdot q = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+d)^t} = \sum_{t=0}^n \frac{C_0 \cdot (1+i)^t}{(1+d)^t} \quad (2.2)$$

Avec :

- n le nombre d'années écoulées depuis l'origine jusqu'à la date de payement
- C le coût à l'année n
- L'inflation annuelle i, qui se traduit par une perte de pouvoir d'achat de la monnaie suite à la croissance des prix.
- Le taux de remise d nominal ("*discount rate*" dans la littérature anglophone) qu'on assume égal au taux d'intérêt bancaire.
- Le facteur d'actualisation nominal q

On verra par la suite comment adapter cette formule pour prendre en compte les spécificités de la rénovation : un investissement initial qui permet de faire des économies d'énergie, et donc d'argent dans le futur. Et donc de calculer une durée de retour sur investissement.

2.3.3 Coût du cycle de vie à l'échelle du bâtiment

Comme pour l'analyse du cycle de vie, il est tout d'abord primordial de définir les frontières du système, c'est à dire de décider quels sont les coûts qui seront inclus dans l'analyse et ceux qui ne le seront pas. Généralement, dans le domaine du bâtiment, on prend en compte les coûts suivants (Allacker 2010) :

- Les coûts d'investissements : coût de la construction du bâtiment et des installations techniques, et coûts de conception (frais d'architectes en % du prix total, etc). Par contre le prix d'achat du terrain n'est pas considéré. Ces coûts sont établis sur base des banques de données de prix pour la construction.
- Les coûts périodiques : coûts opérationnels de chauffage et d'électricité, coûts de maintenance et remplacements des équipements usagés. Ces coûts futurs sont convertis en valeur nette actuelle et additionnés aux coûts d'investissement
- Les coûts de fin de vie : coûts de démolition, transport et traitement des déchets (mise en décharge, incinération ou recyclage).

Les taxes telles que la TVA sont incluses dans le coût du cycle de vie à chacun des niveaux correspondants. En Belgique, la TVA s'élève à 21% pour la construction neuve, l'énergie et le transport et à 6% pour la rénovation. Les exonérations de taxes et les subsides ne sont pas intégrés dans l'analyse (Allacker 2010).

2.4 Analyse et coût du cycle de vie dans la rénovation - Etudes similaires

Cette section présente et synthétise des études similaires portant sur l'analyse et le coût du cycle de vie dans la rénovation. Cette revue de littérature n'a pas la prétention d'être exhaustive. Le but est de mettre en évidence les choix méthodologiques posés et les résultats obtenus par d'autres chercheurs dans le domaine. Ne sont intégrées ici que des études réalisant une évaluation environnementale conformément au cadre méthodologique développé par ISO 14040 et par le CEN (normes EN 15804 et EN 15978).

2.4.1 Vilches, Garcia-Martinez et al. (2016)

Vilches, Garcia-Martinez et al. (2016) ont réalisé une revue de littérature résumant les dernières contributions relatives à l'usage de l'analyse du cycle de vie dans la rénovation.

Ils constatent tout d'abord que le champ de recherche est vaste mais peu exploré, l'analyse du cycle de vie dans le domaine des bâtiments se concentre principalement sur le neuf. Les quelques études portant sur la rénovation se focalisent principalement sur l'évaluation du bâtiment existant par rapport au bâtiment rénové, afin de mettre en avant les économies d'énergie opérationnelles. Très peu d'études réalisent une analyse comparative de différents scénarios de rénovation pour déterminer quel est le plus intéressant du point de vue environnemental.

L'unité fonctionnelle UF la plus couramment utilisée est le m² de surface de plancher du bâtiment sur une durée de vie de 50 ans. Certaines études considèrent le bâtiment entier comme UF, mais alors la comparaison est impossible avec d'autres études. Une seule étude considère une UF par occupants, qui permet de rendre compte du taux d'utilisation des espaces.

La principale différence entre les études est le choix des frontières du système. Les modules de production des matériaux A1-3 sont toujours pris en compte. La phase de transport A4 et la phase de construction A5 ne le sont jamais, alors que les impacts de ces phases ne sont pas négligeables. Le module d'énergie opérationnel B6 est toujours comptabilisé. Cependant certaines études ne prennent en compte que le chauffage alors que d'autres se préoccupent également de l'électricité, de l'eau chaude sanitaire, etc. Pour la fin de vie C1-4 cela varie énormément.

La norme EN 15978 définit le cadre pour le cycle de vie des bâtiments. Dans la phase d'utilisation, on retrouve un module B5 qui porte sur la rénovation et inclut la production des nouveaux matériaux, leur transport, la phase de construction mais aussi la fin de vie des matériaux existants remplacés. Or dans la pratique, les auteurs constatent que l'interprétation sur cette dernière étape du cycle de vie varie considérablement. Certaines études attribuent l'impact de fin de vie des matériaux existants à l'ancien bâtiment et donc n'en tiennent pas compte dans leurs calculs. Alors que d'autres l'attribuent aux travaux de rénovation et le prennent en compte.

Les principales mesures de rénovation dans les scénarios sont : augmenter l'épaisseur d'isolant, remplacer les fenêtres, installer un groupe de ventilation et des panneaux photovoltaïques.

Les études se concentrent sur trois aspects de la rénovation et font ressortir que :

- La réduction de la consommation d'énergie opérationnelle après rénovation est de 30% à 80%.
- La part de l'énergie grise dans le bilan environnemental total oscille entre 10% et 60%.
- Le temps de retour sur investissement environnemental (impact des matériaux auquel on soustrait l'impact de l'énergie économisée) n'est jamais supérieur à 7.5 ans. La rénovation est définie comme pertinente à partir du moment où la durée de vie restante du bâtiment est supérieure à ce temps de retour.

Les auteurs soulignent également d'autres aspects :

- La rénovation a tendance à prolonger la durée de vie du bâtiment au-delà de celle escomptée au départ. Elle intensifie le niveau d'occupation du bâtiment. Ces effets ont tendance à réduire d'autant plus l'impact environnemental du bâtiment et à justifier l'utilité de la rénovation.
- L'impact de la localisation du bâtiment, qui induit un besoin de transport des occupants depuis le bâtiment jusqu'aux services urbains, n'est jamais pris en compte dans les études alors que c'est un paramètre déterminant.
- Rénover engendre moins d'impact que de détruire et reconstruire.
- Aucune étude ne tient compte des aspects socio-économiques.

2.4.2 Pombo, Allacker et al. (2016)

Pombo, Allacker et al. (2016) propose une méthodologie multicritères pour évaluer différents scénarios de rénovation au moyen d'une analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie. Les résultats sont exprimés en valeur monétaire sous la forme du coût des externalités. L'analyse comparative utilise une optimisation de Pareto pour sélectionner les meilleures stratégies de rénovation.

Le cas d'étude est un bâtiment de logement collectif social situé à Madrid, représentatif de la période 1950-1980. Il représente 43% du stock bâti des logements et est potentiellement rapidement améliorable. Sa consommation d'énergie actuelle pour le chauffage et le refroidissement est évaluée grâce à DesignBuilder et Energy+. Elle s'élève à 85.44kWh/m².an. La durée de vie considérée est de 50 ans car le bâtiment est déjà âgé de 50 ans et que les standards considèrent une durée de vie totale de 100 ans.

Trois types de scénarios de rénovation avec des performances différentes sont considérés :

- Le scénario E1 "Business-as-usual", c'est-à-dire la façon de faire classique en rénovation en Espagne. C'est le scénario le moins cher à l'investissement de départ.
- Le scénario E2 "Réglementation espagnole sur les performances des bâtiments" qui fixe des exigences de performances énergétiques minimales à respecter, comme le fait la PEB en Belgique.
- Le scénario E3 "Standard passif" qui vise à atteindre une consommation en énergie primaire inférieure ou égale à 15kWh/m².an.

Des scénarios intermédiaires sont créés entre E2 et E3. Cependant, seule l'épaisseur du matériau isolant croît de E1 à E3. L'analyse est effectuée séparément pour la toiture, les murs et les fenêtres.

L'analyse du cycle de vie respecte les standards ISO 14040 et utilise les catégories d'impact CEN. Elle est réalisée au moyen du logiciel SimaPro. L'inventaire utilise les données génériques de Ecoinvent. Les résultats sont exprimés sous forme monétaire grâce à la méthode MMG vue précédemment dans la section 2.2. Ainsi, les coûts environnementaux peuvent être comparés/ajoutés aux coûts financiers. Ne sont comptabilisés pour l'énergie opérationnelle que le chauffage et le refroidissement.

La notion de coût de cycle de vie est adaptée pour la rénovation. On considère que pour que l'investissement soit valable, le coût de celui-ci doit être inférieur aux économies réalisées pour la durée de vie restante du bâtiment. Sinon il n'y a aucun intérêt financier à le rénover et on préfère le laisser dans son état actuel. La formule de la valeur actuelle nette VAN de la page 2.2 est transformée en conséquence. On détermine une durée de retour sur investissement.

L'analyse comparative cherche à identifier les scénarios les plus intéressants, par ordre de priorité, pour optimiser l'impact environnemental et financier du bâtiment sur sa durée de vie restante. Elle est réalisée grâce à la méthode de Pareto qui considère que l'optimum est atteint lorsqu'il n'est plus possible d'améliorer une performance sans diminuer considérablement une autre. Les objectifs poursuivis pour l'optimisation sont :

- Les économies financières les plus importantes pour l'investissement financier le plus faible.
- Les économies environnementales les plus importantes pour l'investissement environnemental le plus faible.
- Les économies environnementales les plus importantes pour l'investissement financier le plus faible.
- Les économies environnementales les plus importantes pour les économies financières les plus importantes.

Les résultats montrent que le scénario E1, "classique", n'est pas optimal car les économies environnementales sont faibles. Il devrait être uniquement choisi si le budget est très serré. Le scénario intermédiaire E2b se démarque nettement car avec seulement 8% d'investissement financier supplémentaire, il réalise 43% d'économies environnementales et 45% d'économies financières en plus. Les scénarios suivants mènent à des améliorations mineures, mais sont beaucoup plus onéreux. Le scénario passif E3 est impossible à atteindre avec les épaisseurs d'isolants disponibles sur le marché espagnol. L'objectif doit être revu à la baisse, 30kWh/m².an. Même ainsi, le scénario E3 est le plus cher de tous. Même s'il réalise les économies environnementales et financières les plus importantes entre tous les scénarios, l'investissement de départ est bien trop conséquent. L'installation d'une ventilation mécanique double-flux par exemple, est une mesure qui n'est pas du tout intéressante du point de vue financier.

3.1 Sujet et questions de recherche

L'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier les différentes possibilités à disposition des particuliers, architectes et entrepreneurs en matière de rénovation énergétique des bâtiments résidentiels en Belgique. Une analyse du cycle de vie permet de déterminer l'impact environnemental de ces solutions. Elle est mise en parallèle avec le coût du cycle de vie afin de mettre en lumière les matériaux et techniques de mise en oeuvre associées, les plus intéressants du point de vue environnemental et financier. En définitive, on cherchera à répondre aux questions de recherche suivantes :

- "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 ?"

3.2 Processus du mémoire

Ce mémoire commence par une collecte d'informations. Cette collecte est tout d'abord théorique. Elle se fait au moyen d'une revue de littérature afin de définir plus précisément le sujet et de constituer un état de l'art. Cet état de l'art porte sur : les concepts d'analyse et de coût du cycle de vie, la présentation de la méthodologie de l'outil TOTEM dont je m'inspire pour ce travail, et enfin une courte revue de littérature reprenant les conclusions d'études scientifiques similaires traitant de l'analyse du cycle de vie dans la rénovation.

Ensuite, la méthodologie et les différentes parties du travail sont fixés : sélection du cas d'étude, récolte de données lors d'interviews en entreprises, choix des scénarios de rénovation, processus de calcul et analyse comparative (Figure 3.1). Les hypothèses de recherche sont posées ainsi que les limites considérées telles que décrites dans la section suivante. De cette façon, le sujet est clairement défini et permet de restreindre l'étude au cadre que l'on se fixe. Enfin, on fait le choix des outils et logiciels qui

nous serons utiles pour les calculs.

Une analyse de cycle de vie au niveau du bâtiment nécessite bien entendu de sélectionner un cas d'étude. Afin de maximiser l'utilité de cette étude et la pertinence des résultats obtenus, il est préférable de choisir un bâtiment représentatif du stock bâti de logements belge. Après une revue de littérature sur le sujet, la typologie retenue est la suivante : les maisons quatre façades construites entre 1945 et 1969. Le cas d'étude de ce travail est issu d'un projet de recherche en cours mené par Attia S., Mustafa A., et al. qui vise à évaluer les performances énergétiques réelles des typologies de bâtiments construits dans la période d'après-guerre en Belgique.

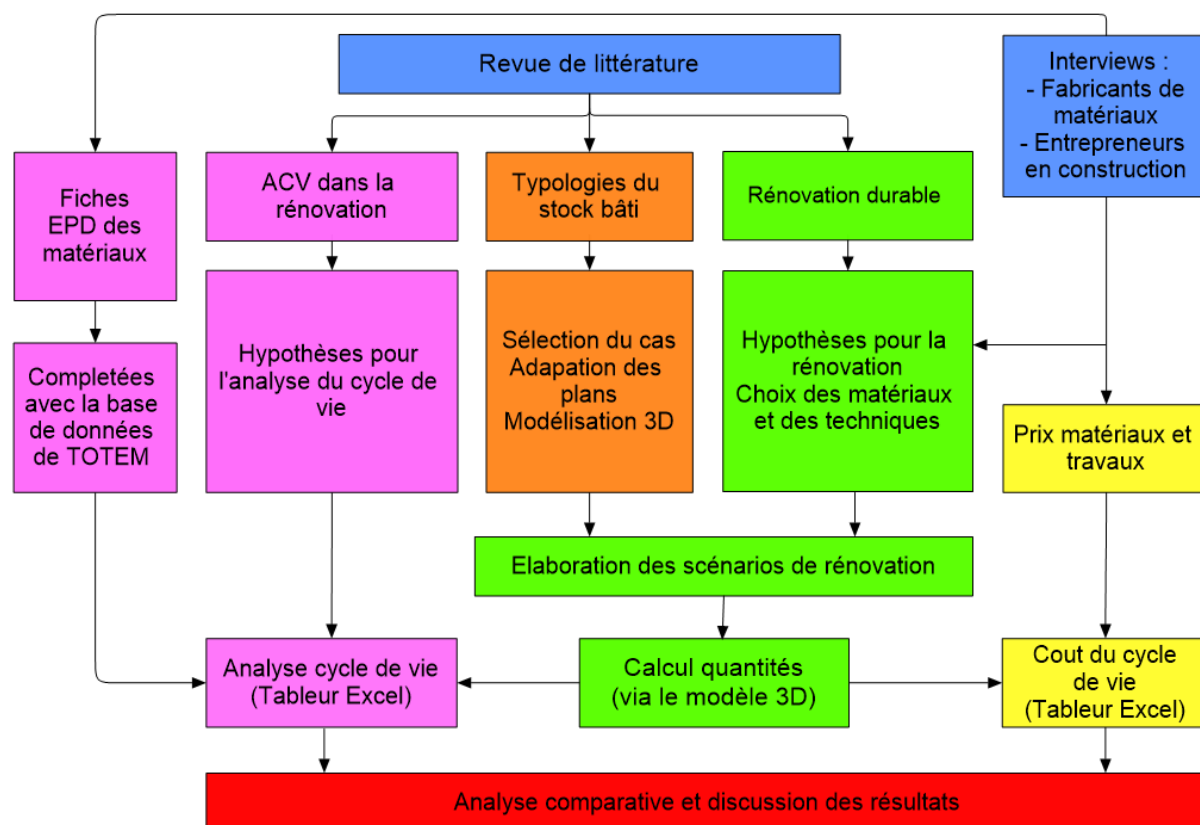


FIGURE 3.1 – Processus du mémoire

L'enquête de terrain permet de donner plus de profondeur à ce travail. J'ai rencontré et interviewé plusieurs professionnels du monde de la construction. En premier lieu, je me suis rendu dans des entreprises basées en Wallonie et fabriquant des isolants écologiques afin de visiter leur usine, de les interroger sur leurs produits et de recueillir les fiches EPD nécessaires pour l'analyse du cycle de vie. Dans un second temps, j'ai pris contact avec des entrepreneurs en construction utilisant ce type de matériaux au quotidien sur des chantiers de rénovation. Leurs conseils furent précieux pour l'élaboration des différents scénarios de rénovation.

Après ces entretiens, les informations récoltées sont recoupées entre elles pour dégager les pistes de rénovations les plus intéressantes. Il est nécessaire de réaliser une sélection car il n'est pas possible de

retenir toutes les propositions. En définitive, j'ai retenu : six scénarios pour la rénovation des murs, six scénarios pour la rénovation de la toiture et trois scénarios de remplacement des châssis. Ceux-ci sont présentés dans le chapitre 5. Les épaisseurs des couches de matériaux sont définies de façon à respecter plus ou moins la même valeur U pour chaque type de paroi donnée. De cette façon, il est possible de comparer entre eux les scénarios au niveau de la paroi. Une rapide vérification du risque de condensation interne par diffusion de vapeur est réalisée grâce à la méthode de Glaser.

La première étape de l'analyse du cycle de vie consiste à réaliser l'inventaire. Les quantités mises en oeuvre sur chantier sont déterminées grâce au modèle 3D. Pour réaliser les calculs, les fiches EPD de chaque matériau sont encodées dans le logiciel. Elles sont pondérées de façon à exprimer l'impact environnemental par m^2 . Multipliées par les quantités correspondantes dans le logiciel, on obtient l'impact environnemental au niveau de la paroi dans son ensemble. Celui-ci est exprimé de façon individuelle selon les différentes catégories d'impact, mais aussi de façon globalisée au moyen du score total monétisé comme dans l'outil TOTEM. Le coût du cycle de vie est calculé de façon similaire en intégrant dans le fichier de calcul l'équation 2.2 de la valeur actuelle nette VAN vue à la page 38.

Après obtention des résultats au niveau des parois, on retient les solutions de rénovation les plus intéressantes du point de vue environnemental et financier. Celles-ci sont assemblées de façon à constituer trois scénarios de rénovation globale au niveau du bâtiment. L'analyse comparative au niveau du bâtiment met en évidence les différences entre ces scénarios, pour faire ressortir des observations et en tirer des conclusions. Sont comparés :

- L'impact environnemental de chacun des scénarios entre eux.
- Le coût du cycle de vie de chacun des scénarios entre eux.
- L'impact environnemental relativement au coût du cycle de vie.

3.3 Choix des logiciels

L'adaptation des plans d'origine du cas d'étude et le dessin de la coupe est réalisé au moyen du logiciel AutoCAD 2015 (Figure 3.2). SketchUp 2015 a permis ensuite de modéliser ce cas d'étude et les différents scénarios de rénovation retenus ainsi que les compositions de parois correspondantes. Les quantités de matériaux utilisées lors de la rénovation sont déterminées sur base de ce modèle 3D.



FIGURE 3.2 – Logiciels AutoCAD 2015 et SketchUp 2015

L'analyse du cycle de vie est basée sur la méthodologie développée par TOTEM (Figure 3.3) présentée dans la section 2.2. Cependant, j'ai fait le choix de réaliser les calculs indépendamment de la plate-forme en ligne prévue à cette effet pour les deux raisons suivantes :

- Un certain nombre de paramètres importants de l'analyse de cycle de vie ne peuvent tout simplement pas être modifiés dans TOTEM. Tels que : la durée de vie, l'unité fonctionnelle, les étapes du cycle de vie prises en compte dans les calculs, la méthode de calcul de la consommation d'énergie opérationnelle, etc.
- Il est impossible d'introduire de nouveaux matériaux ou de modifier les matériaux existants dans TOTEM. Les déclarations EPD des entreprises wallonnes ont vocation à être implantées dans l'outil, mais à l'heure actuelle ce n'est pas encore le cas.

Sous certains aspects, je trouve que TOTEM est un peu une sorte de "boîte noire". Voilà pourquoi j'ai préféré me détourner de cette plate-forme en ligne. Cependant, je m'en suis largement inspiré pour construire une feuille de calcul dans le logiciel Excel (Figure 3.4). En procédant de cette façon, j'ai le contrôle total sur les paramètres de l'analyse du cycle de vie. Ce fichier est construit selon la structure modulaire matériaux/éléments/parois/bâtiments de TOTEM qui autorise une analyse du cycle de vie à des niveaux différents. Le coût du cycle de vie est lui aussi intégré à cette feuille de calcul. Le coût d'investissement nécessaire pour les travaux est calculé sur base d'un devis. Le coût du cycle de vie tient compte de l'évolution des prix de l'énergie dans le temps et des remplacements de matériaux arrivés en fin de vie. Ces coûts sont actualisés grâce à l'équation 2.2 de la valeur actuelle nette VAN vue à la page 38.



FIGURE 3.3 – TOTEM - Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials.
Plateforme en ligne d'analyse de cycle de vie du bâtiment : www.totem-building.be



3.4 Récolte et traitement des données

Afin d'approcher de la réalité, j'ai constitué une base de données environnementales des matériaux grâce à des fiches EPD (Environmental Product Declaration) provenant d'entreprises de matériaux actives en Belgique. Les données manquantes proviennent de la bibliothèque de matériaux de TOTEM, qui est construite sur base des données d'Ecoinvent. Ces données sont adaptées pour tenir compte des spécificités belges : localisation des usines, distance moyenne de transport jusqu'au chantier, mix énergétique de notre pays, filière de recyclage, etc.

Il a été nécessaire de réaliser un traitement de données pour harmoniser les fiches EPD des entreprises avec les données de TOTEM. TOTEM exprime l'impact environnemental par m^2 de matériau. Alors que les fiches EPD expriment souvent leurs données grâce à une unité fonctionnelle différente : m^3 , kilogramme, en palette à la sortie d'usine, etc. Toutes les données environnementales sont donc converties pour être exprimée en m^2 .

Les données de TOTEM ne tiennent pas compte de la séquestration de carbone par les végétaux pendant leur croissance, appelé aussi "carbone biogénique". L'hypothèse est faite que le CO_2 capté durant la croissance des plantes sera intégralement réémis en fin de vie et que donc le bilan total sur le cycle de vie est nul. C'est l'hypothèse "carbon neutral". Par contre, les entreprises produisant des matériaux d'origine bio-sourcé tiennent généralement compte de cette séquestration de carbone dans leurs calculs d'analyse du cycle de vie. En effet, cela leur permet d'afficher un bilan carbone négatif pour la phase de production des matériaux, afin de faire la promotion du caractère écologique de leur produit. J'aurais souhaité faire intervenir cette séquestration de CO_2 dans mes calculs afin de rendre compte de ces effets. Mais pour avoir une base de données cohérente, j'ai dû m'aligner sur la méthode de TOTEM en convertissant les fiches EPD récoltées auprès des entreprises pour retirer ce carbone biogénique.

Les données de prix récoltées auprès des entreprises étaient très variables, et ne s'exprimaient pas toujours de la même façon : prix du matériaux brut HTVA à la sortie d'usine à destination des entrepreneurs, prix incluant la main d'oeuvre à destination des particuliers, etc. Plus il y a d'intermédiaires, plus cela se complexifie. Pour agréger tout cela et valider ou non les devis récoltés auprès des entreprises, on utilise le bordereau des prix unitaires de la construction (Union Royale Professionnelle d'Architectes, 2017).

3.5 Hypothèses générales et limites de l'étude

Tout d'abord, il convient de fixer le périmètre des travaux de rénovation énergétique. Pour améliorer les performances d'un bâtiment existant, on pourrait jouer sur plusieurs leviers : l'isolation

de l'enveloppe, l'optimisation des équipements de chauffage et ventilation, la production d'énergie renouvelable, le comportement des occupants, etc. Néanmoins, cette étude se concentre exclusivement sur l'amélioration des performances énergétiques des parois constituant l'enveloppe. C'est-à-dire sur :

- L'isolation à posteriori de la toiture inclinée
- L'isolation à posteriori des murs
- Le remplacement des châssis et portes existantes

Cela pour deux raisons. En premier lieu, parce que les experts se mettent d'accord sur le fait que la priorité absolue en matière de rénovation durable est l'isolation thermique performante de toutes les parois en contact avec l'extérieur (Verbeeck, Hens, 2005) (Kints, 2008) (Hauglustaine, Monfils, 2009). C'est en effet ce qui permet de faire les économies d'énergie les plus importantes comparativement à l'investissement. Par la suite, il est possible de remplacer les équipements de production de chaleur et de ventilation si le budget est suffisant. Deuxièmement, le but de cette étude est de mettre en évidence l'impact environnemental induit par le choix de certains matériaux plutôt que par d'autres. Par conséquent, faire varier les équipements dans les différents scénarios entraînerait plus de confusion qu'autre chose. On précisera également que cette rénovation se fait uniquement dans un objectif énergétique, elle ne prévoit pas d'agrandir le volume bâti au moyen d'une extension ou d'en profiter pour changer l'organisation et l'aménagement des espaces intérieurs.

Pour la méthode d'isolation, on fait le choix l'isolation par l'extérieur. Cette méthode possède de nombreux avantages : elle permet d'atteindre de meilleures performances car elle minimise le nombre de ponts thermiques. Elle est facile à mettre en oeuvre et permet de placer des épaisseurs d'isolants importantes sans perte d'espace intérieur. De plus, les occupants peuvent continuer d'habiter le bien pendant les travaux. Cependant, ce sont des travaux d'envergure qui nécessitent l'installation d'échafaudages. Le volume de matériaux à placer est plus important que pour l'isolation par l'intérieur. De plus, il est nécessaire de refaire le revêtement extérieur par après, ce qui pose des contraintes urbanistiques dans un certain nombre de communes. Dans notre cas, puisque le bâtiment est isolé sur la parcelle et n'a pas de valeur patrimoniale, on considérera que cela n'a pas d'importance.

Les matériaux des scénarios de rénovation sont sélectionnés de façon à comparer deux façons bien distinctes de rénover tel que défini ci-dessous :

La rénovation dite "conventionnelle" : c'est la plus répandue en Belgique et généralement la plus abordable. Elle détiendrait plus de 90% des parts de marché selon les experts interrogés. Elle a généralement recours à des matériaux à l'impact environnemental élevé tel que les mousses isolantes synthétiques et les laines minérales.

La rénovation durable : elle fait figure d'exception à l'heure actuelle dans le domaine de la construction. Elle vise à minimiser l'impact environnemental des travaux. Pour cela, elle utilise des matériaux régénératifs, c'est-à-dire des matériaux qui sont conçus de façon à ce que leurs composants

puissent être réintroduits dans les cycles naturel ou industriel (Attia, 2018). En pratique, cela inclut le plus souvent des matériaux bio-sourcés, naturels ou issus du recyclage.

L'objectif ouvertement affiché de cette comparaison est de mettre en lumière l'intérêt des matériaux régénératifs pour la rénovation. Toutes les entreprises que j'ai pu interviewer sont des entreprises actives dans la construction à caractère écologique. Je n'ai consulté aucune entreprise ayant recours uniquement à des matériaux conventionnels. Leur positionnement sur ces sujets n'est donc pas intégré dans ce travail.

La performance énergétique finale ciblée pour la rénovation de notre cas d'étude est directement issue des exigences PEB en application du 1er juillet 2019 au 31 décembre 2020. La nature des travaux que nous allons effectuer fait partie de la catégorie "travaux de rénovation importants", parce que l'intervention porte sur plus de 1/4 de l'enveloppe du bâtiment (la totalité dans notre cas). Par conséquent, en plus d'une demande de permis d'urbanisme, il convient de réaliser une déclaration PEB initiale et finale (SPW Energie, 2018). Les exigences se résument à respecter les valeurs U_{max} pour les différentes parois comme montré dans le tableau 3.1.

Parois délimitant le volume protégé	U_{max} (W/m ² K)
Toitures et plafonds	0.24
Murs	0.24
Planchers	0.24
Portes et portes de garage	2.00
Fenêtres	
- Ensemble châssis et vitrage	1.50
- Vitrage uniquement	1.10

TABLE 3.1 – Valeurs U maximales en application à partir du 1er janvier 2017.
Sources : Annexe C1 de l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014

Nous aurions pu faire le choix de critères plus ambitieux tel que le standard passif. Mais Pombo, Allacker et al. (2016) ont montré que celui-ci est très difficile à atteindre en rénovation et trop cher pour que l'investissement en vaille la peine. Nous nous contenterons donc de cibler une valeur U de paroi inférieure à 0.24 W/m²K.

3.6 Hypothèses de l'analyse et du coût du cycle de vie

Ce travail est basé sur la méthodologie MMG développé par l'OVAM dans le cadre de l'outil TOTEM. Nous ne détaillerons donc ici que les différences méthodologiques existant entre cette étude et la méthode MMG. Pour toute autre information sur la méthodologie de ce travail qui ne se retrouverait pas dans cette section, il convient de se rapporter à la section 2.2 de l'état de l'art.

L'unité fonctionnelle considérée varie selon le niveau d'analyse auquel on se situe. Pour l'analyse du cycle de vie au niveau des parois, l'unité fonctionnelle correspond à l'entièreté de la paroi sur la durée de vie du bâtiment. Pour l'analyse du cycle de vie au niveau du bâtiment, on considère tout d'abord le bâtiment entier sur toute la durée de vie. Les résultats bruts sont ensuite exprimés en m² de surface de plancher brute SPB afin de faciliter la comparaison avec d'autres études du même type. Les résultats bruts obtenus correspondront à cette unité fonctionnelle.

La durée de vie restante du bâtiment est fixée à 40 ans car le cas d'étude, construit en 1960, est déjà âgé de 60 ans et qu'il est habituel de considérer une durée de vie totale de 100 ans (Pombo, Allacker, 2016). La durée de vie est l'un des paramètres les plus sensible d'une analyse du cycle de vie, qui peut affecter significativement les résultats obtenus (Wijnants, Allacker, 2015). Par conséquent, on réalise une analyse de sensibilité en tenant compte d'une durée de vie de 20 ans, puis d'une durée de vie de 60 ans.

Toutes les étapes du cycle de vie telles que définies dans la norme ISO14040 et dans son adaptation au secteur du bâtiment au travers de EN 15804 :2012 sont considérées dans le cadre de cette étude :

- La phase de production des matériaux (modules A1-3).
- Le transport jusqu'au chantier et la construction du bâtiment (modules A4-5).
- La phase d'utilisation (modules B1-7).
- La fin de vie (modules C1-4).

Pour la phase d'utilisation cependant, on ne prend en compte que la consommation d'énergie pour le chauffage et pas pour l'électricité (une fraction du module B6 donc) et le remplacement des matériaux arrivés en fin de vie (module B4).

Les résultats de l'analyse du cycle de vie sont exprimés tel que préconisé par le CEN dans la norme EN 15804 :2012. C'est-à-dire en utilisant les 7 catégories d'impact servant d'indicateurs de base. Nous n'utilisons pas ici le second groupe d'indicateurs CEN+ contrairement à TOTEM.

- **Réchauffement climatique** (kg CO₂ équivalent)
- **Appauvrissement de la couche d'ozone** (kg CFC-11 équivalent)
- **Acidification des sols et de l'eau** (kg SO₂ équivalent)
- **Eutrophisation** (kg (PO₄)³⁻ équivalent)
- **Formation d'ozone photochimique** (kg Ethylène équivalent)
- **Épuisement des ressources abiotiques : éléments** (kg Sb équivalent)
- **Épuisement des ressources abiotiques : combustibles fossiles** (Mégajoule)

3.7 Hypothèses du coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie est calculé en considérant une durée de vie de 40 ans également. Tous les coûts sont exprimés en valeur actuelle nette VAN grâce à l'équation 2.2 vue à la page 38. Celle-ci est adaptée à la rénovation en tenant compte des économies financières réalisée sur la facture d'énergie. Elles sont comptées de façon négative.

Dans les calculs du coût du cycle de vie, le taux d'actualisation nominal est de 0.74%, la croissance des prix annuelle de l'énergie est de 3.18% et la croissance des prix de la construction est de 2.27%. Ces valeurs sont obtenues en prenant la moyenne des taux d'évolution des prix sur les 10 dernières années. En ce qui concerne les phases du cycle de vie prise en compte. Le coût de remplacement des matériaux arrivés en fin de vie est comptabilisé. Sauf s'il est précisé que ce n'est pas le cas pour certaines figures. Par exemple, la comparaison des scénarios de rénovation vis-à-vis de la situation existante n'inclut pas les coûts de remplacement et de fin de vie car on considère qu'ils sont du même ordre de grandeur pour les scénarios et pour l'existant.

3.8 Moyens de compléter cette étude

Une des façons de compléter cette étude serait d'élargir le champ de celle-ci en multipliant les scénarios et les matériaux étudiés. Il serait également possible d'augmenter progressivement la valeur U des parois (et donc l'épaisseur d'isolant correspondante) jusqu'à atteindre le standard passif de $U = 0.15$. On pourrait également intégrer le remplacement des équipements de production de chaleur et l'installation d'unités de production d'énergie et faire varier leur modèle. Enfin, puisque cette étude ne porte que sur une seule typologie de bâtiment, il serait pertinent de reproduire la démarche pour les autres catégories de logement prioritaires pour la rénovation : les maisons mitoyennes (et jumelées), généralement urbaines datant d'avant 1919 et les maisons isolées (rurales) d'avant 1919 (Kints, 2008). Leurs qualités patrimoniales rendent l'exercice plus complexe mais non moins intéressant.

4

Sélection du cas d'étude

4.1 Sélection d'une typologie

Afin de maximiser l'utilité de cette étude et la pertinence des résultats obtenus, le cas d'étude se doit d'être représentatif d'une fraction significative du stock bâti belge. Une revue de littérature de Kints (2008), Gendebien et al. (2014), Prodopapadaki et al. (2014) et du chapitre 4 du guide de la rénovation énergétique et durable édité par la DGO4 (DGO4, 2014) a permis de sélectionner une typologie de bâtiment prioritaire pour la rénovation.

Les critères de choix de cette typologie étaient :

- Un logement belge unifamilial.
- Des performances énergétiques médiocres (faiblement ou pas du tout isolé).
- Aucun caractère patrimonial, afin de permettre tout type d'intervention sur la façade.
- La possibilité d'isoler par l'extérieur.

En définitive, la typologie retenue dans le cadre de ce travail est la suivante : les maisons unifamiliales, quatre façades, construites entre 1945 et 1969, en Belgique. Cette époque se caractérise par une reconstruction intense pendant l'après-guerre. Les logements construits durant cette période représentent 23.8% du stock des logements wallons (DGO4, 2014). Les maisons quatre façades datant de cette époque représentent environ 90 000 bâtiments (DGO4, 2014) comme on peut le voir sur la figure 4.1. De nouvelles techniques constructives voient le jour ainsi que de nouveaux matériaux tels que les blocs bétons légers isolants (Van de Voorde 2015). Les matériaux isolants existent déjà, mais leur utilisation ne prendra son essor qu'après le premier choc pétrolier de 1973. L'urbanisation se poursuit en dehors des villes grâce à l'avènement de l'automobile individuelle.

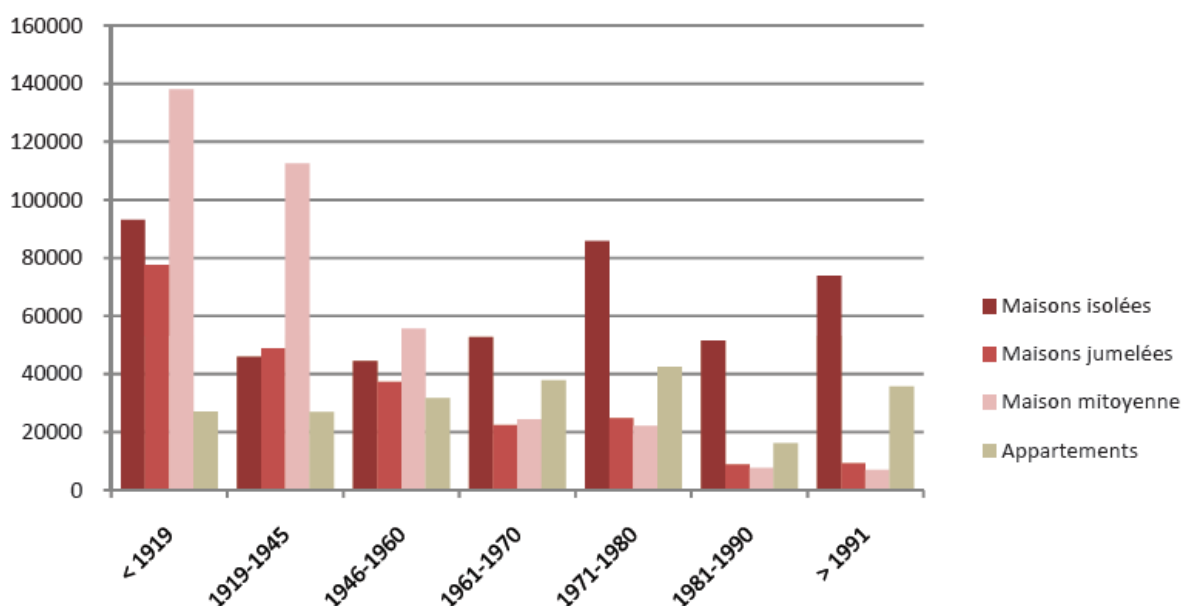


FIGURE 4.1 – Croisement entre le type et l'époque de construction des logements. Sources : Enquête socio-économique 2001 - DGSIE, SPF Economie)

4.2 Présentation du cas d'étude

4.2.1 Origine du cas d'étude

Le cas d'étude de ce travail est issu de "*Developing two benchmark models for post-world war residential buildings*", projet de recherche mené par Attia S., Mustafa A., Giry N. et Popineau M. sur la période 2018-2020. Dans cet article, les auteurs cherchent à évaluer les performances énergétiques réelles des typologies de bâtiment construit dans la période après-guerre en Belgique. Pour cela, ils ont réalisé un inventaire sur base du cadastre et une enquête de terrain sur plus de 1000 logements unifamiliaux quatre façades datant de cette période. Celle-ci a servi à caractériser les performances de chacun des bâtiment et le comportement des occupants. L'analyse a permis de faire ressortir deux maisons références représentatives de la typologie :

- Archétype A pour la période 1945 – 1969
- Archétype B pour la période 1970 – 1990.

L'analyse de la consommation d'énergie s'est faite tout d'abord de façon empirique en réalisant un audit énergétique complet pour chacun des archétypes et en compilant les factures d'énergie de 2014 à 2019. Les données récoltées ont ensuite permis de réaliser une simulation de performances grâce au logiciel EnergyPlus.

4.2.2 Détails de l'Archétype A

L'archétype A est une maison quatre façades unifamiliale construite en 1960 qui se situe dans un quartier résidentiel de la commune de Dessel, en Flandres. La figure 4.2 présente des photos de cette maison.

C'est une maison au plan rectangulaire compact garnie d'une toiture à deux versant inclinés de 45°. La surface de la maison est de 150 m² s'organisant en deux niveaux principaux. Au rez-de-chaussé, on retrouve les pièces de vie. L'étage est réservé aux chambres. Les pièces de l'étage sont en partie mansardées. Les combles sont laissés vides et inoccupés. La maison dispose d'une cave de même surface que le rez-de-chaussé.

Les performances énergétique de ce logement sont médiocres. La consommation d'énergie finale est de 185kWh/m².an. La consommation d'énergie primaire est de 475kWh/m².an. Ce qui correspondrait au label "F" tel que définit par la certification PEB. Le logement est équipé d'une chaudière à gaz avec un rendement de 92%. La température de consigne varie de 20 à 23°C. Pour ce qui est de l'étanchéité à l'air, le n₅₀ est de 3.5 v/h.

Le tableau 4.1 détaille la conductivité thermique respective de chacune des parois. La composition des murs mentionnée dans l'étude est exposée dans le tableau 4.2 Elle est déterminée sur base de la littérature existante (Van De Voorde 2015).

Parois délimitant le volume chauffé	U_{max} (W/m ² K)
Toitures à versant	1.7
Murs	1.85
Planchers	0.85
Fenêtres	
- Ensemble châssis et vitrage	5.7
- Vitrage uniquement	5.8

TABLE 4.1 – Conductivité thermique des parois existantes de l'Archétype A.
Source : Attia, Mustafa et al. 2020

Couche	Élément	Épaisseur (m)	λ (W / mK)
1	Brique de parement pleine	0.10	/
2	Coulisse ventilée	0.07	/
3	Bloc de béton léger	0.14	0.35
4	Enduit intérieur	0.02	/

TABLE 4.2 – Composition du mur existant de l'Archétype A.
Source : adapté d'après Attia, Mustafa et al. 2020. Valeur lambda d'après Van De Voorde 2015

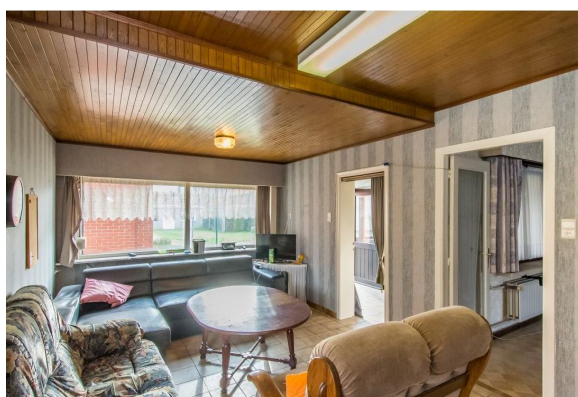


FIGURE 4.2 – Archétype A - maison unifamiliale 4 façades de 1960 située à Dessel, Flandres, Belgique.
Source : Attia, Mustafa et al. 2020

4.2.3 Adaptation de l'Archétype A aux besoins de l'étude

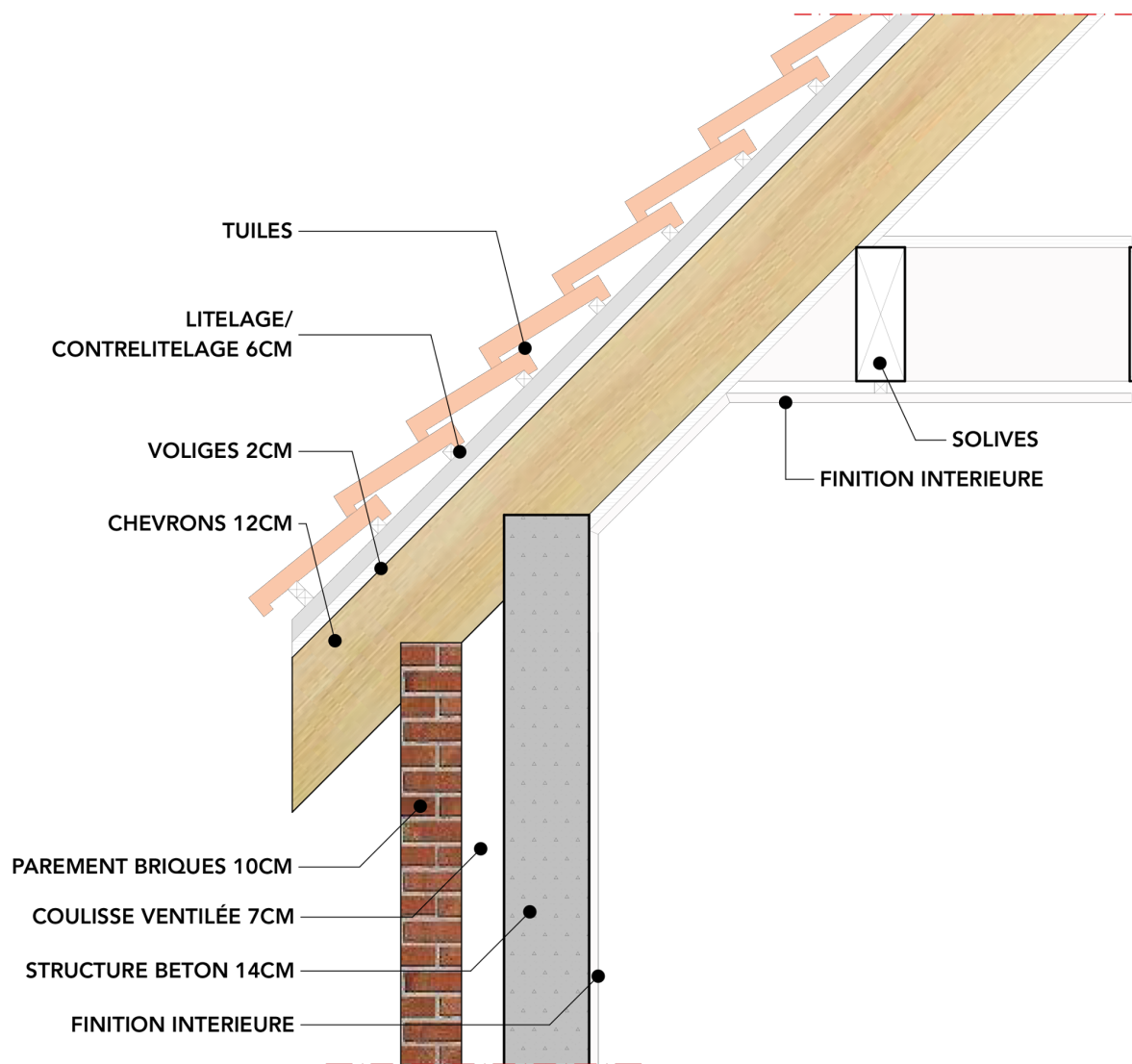
Les plans d'origine de l'Archétype ont du être adaptés aux besoins de l'étude. Le rez-de-chaussé a été transformé de façon à accueillir un garage. Et la salle de bain a été déplacé a l'étage. Les plans d'origine, les plans modifiés et la coupe sont disponible en annexe.

La figure 4.3 illustre la composition des murs et de la toiture pour l'Archétype A adapté.

Le modèle 3D du bâtiment a été construit sur base de ces plans modifiés dans le logiciel SketchUP. Un aperçu de ce modèle est présenté sur les figures 4.4 et 4.5. Les surfaces de paroi pour le calcul des quantités de matériaux sont déterminées sur base de ce modèle. Elles sont reprises dans le tableau 4.3.

Type de paroi	Surface (m ²)
Murs extérieurs en briques	172.92
Toiture à versant (par l'extérieur)	100.16
Toiture à versant (par l'intérieur)	79.80
Vitrage	9.72
Surface de plancher brute R0	80.33
Surface de plancher brute R+1	55.83
Surface de plancher brute Total	136.16

TABLE 4.3 – Surface des parois de l'Archétype A adaptés aux besoins de l'étude



BSP Publication Services 0.02.100.100

FIGURE 4.3 – Composition des parois du cas d'étude Archétype A.



FIGURE 4.4 – Aperçu du modèle 3D de l'Archétype A adapté aux besoins de l'étude



FIGURE 4.5 – Aperçu du modèle 3D de l'Archétype A adapté aux besoins de l'étude

5

Présentation des scénarios de rénovation

Cette section présente les scénarios de rénovation pour les trois postes de rénovation : les murs extérieurs, la toiture et les fenêtres. Les scénarios sont construits sur base des informations et conseils recueillis auprès des entreprises productrices de matériaux et des entrepreneurs en construction rencontrés dans le cadre de ce travail. Ces informations, et les problématiques qu'elles soulèvent, sont exposées dans la partie "considérations générales" au début de chaque section. Les compositions de paroi des scénarios sont ensuite présentées brièvement.

5.1 Rénovation des murs extérieurs

5.1.1 Considérations générales

Il est fréquent d'entendre dire, à juste titre, que l'isolation de la toiture est prioritaire par rapport à celle des murs. Néanmoins, dans un bâtiment, ce sont les murs qui présentent le plus de contact avec l'extérieur et possèdent donc la plus grande surface de déperdition. Il est donc impératif de les isoler correctement. En pratique, cela peut être un vrai défi car les murs sont souvent constitués d'un grand nombre de couches de matériaux différents. Par ailleurs, ils sont percés en de nombreux points par des ouvertures. Ces endroits sont à traiter avec précaution, en particulier pour l'étanchéité à l'air. De plus, les murs sont tenus d'assurer le transfert des charges du bâtiment jusqu'aux fondations.

Concernant notre cas d'étude, les murs existants sont composés d'une structure en blocs de béton léger de 14cm, d'une coulisse ventilée de 7cm et d'une brique de parement de 10cm. Deux solutions se démarquent pour réaliser leur isolation :

- Isoler les 7cm de la coulisse ventilée par insufflation et mettre en oeuvre un autre isolant, d'une dizaine de centimètres environ, contre les briques existantes pour atteindre la valeur U désirée. C'est la solution retenue dans les scénarios de murs 1, 2 et 3.
- Démolir les briques afin de mettre en oeuvre un isolant directement contre le mur porteur. Cette technique permet de ne pas entrainer de surépaisseur du mur. C'est la solution retenue dans les scénarios de murs 4, 5 et 6.

La seconde solution à l'avantage de présenter une composition de paroi bien plus simple et moins épaisse. En supprimant 10 cm de brique + 7cm de coulis, on dispose de 17cm pour placer un isolant sans excéder l'épaisseur d'origine du mur. La largeur de la fondation existante est suffisante pour poser l'isolant. Même si celui-ci déborde, cela ne pose pas de problème tant que les 2/3 de sa largeur reposent sur la fondation. Ce système ne nécessite pas d'intervenir sur la toiture existante pour créer des débords venant couvrir les hauts de mur. En revanche, démolir l'ensemble des briques existantes est un travail long, pénible et coûteux à cause de leur surface importante. De plus, les vibrations et le bruit des marteaux-piqueurs rendent impossible d'habiter la maison pendant le temps des travaux. Les habitants doivent donc déménager pendant plusieurs jours.

Dans les scénarios 1, 2 et 3 où les briques sont conservées, nous ferons le choix de combler la coulis ventilée avec de l'isolant. Les avis des artisans divergent sur ce sujet. Certains estiment que cela n'est pas nécessaire si la coulis n'est ventilée que par le pied de mur, car cela ne crée pas de courant d'air ascensionnel. D'autres pensent au contraire qu'il est vital de la remplir.

Isoler la coulis au moyen d'une insufflation est un chantier rapide, peu cher et efficace du point de vue thermique. Dans les bâtiments non-isolés, les premiers centimètres d'isolant sont toujours les plus importants.

Il est obligatoire de mettre en oeuvre des isolants imputrescibles car il n'y a pas de coupure d'humidité au pied du mur existant, et l'isolant est donc soumis aux remontées d'humidité. Il est important d'étudier la migration de la vapeur d'eau dans ce type de paroi pour éviter la pourriture de l'isolant puisque celui-ci est coincé entre la brique et le béton qui sont des matériaux relativement étanches. Comme isolant à insuffler, on retrouve : les billes de polystyrène, le liège expansé en vrac ou encore les fibres de laine de verre. Ce sont les matériaux utilisés dans les scénarios 1, 2 et 3. Avant toute opération, il est nécessaire d'évaluer l'état de propreté de la coulis. En effet, elle peut être remplie de déchets de mortier datant de la construction d'origine, surtout en pied de mur ce qui peut engendrer des ponts thermiques une fois le bâtiment rénové. Il est donc absolument nécessaire de réaliser des sondages en plusieurs endroits afin de vérifier l'état de cette coulis. Autre point négatif, peu importe l'isolant mis en oeuvre dans la coulis, les fixations métalliques d'origine attachant les briques à la maçonnerie porteuse traverseront l'isolant en de nombreux points qui constitueront d'innombrables ponts thermiques ponctuels. Quoiqu'il arrive, l'épaisseur de cette coulis est bien trop faible pour permettre d'atteindre les exigences PEB pour la rénovation uniquement de cette façon.

Il est donc impératif de poser une isolation complémentaire par-dessus les briques. Pour venir protéger cette surépaisseur en sommet de mur, il sera nécessaire de créer un débord de toiture sur les pignons ou une couvertine en aluminium. Nous devons également creuser une tranchée en pied de mur et placer un isolant enterré résistant à la compression et imputrescible comme le verre cellulaire pour gérer le noeud constructif à cet endroit (déperditions thermiques par conduction à travers la dalle).

Pour les isolants extérieurs en façade, presque tous les choix sont possibles. Les isolants sous formes de panneaux rigides peuvent être collés ou fixés mécaniquement contre la paroi. Les isolants sous forme de matelas semi-rigides et la cellulose à insuffler nécessiteront préalablement de construire une structure bois secondaire contre les briques. Le choix de l'isolant dépend aussi du type de revêtement de façade souhaité.

Pour les isolants en panneaux rigides collés ou fixés mécaniquement, la finition la plus évidente sera l'enduit de façade. Le bardage est peu adapté car la fixation des lattes nécessitera de percer entièrement l'isolant pour rejoindre le mur porteur. La face externe des panneaux est souvent rainurée de façon à fournir un meilleur support d'accroche pour l'enduit. Cette technique de mise en oeuvre est appelée système "ETICS". Dans notre étude, on considérera :

- Les panneaux de polystyrène expansés EPS (scénario murs 1 et 6)
- Les panneaux de polyuréthane PUR (scénario murs 2)
- Les panneaux de liège expansé (scénario murs 3)

Pour les isolants qui nécessitent d'être placés entre les montants d'une ossature, les deux choix sont possibles : enduit ou bardage. Le bardage est toutefois le choix plus fréquent car les lattes sont faciles à fixer dans les montants de l'ossature. Dans notre étude, on considérera pour les murs :

- La laine de verre sous forme de panneaux semi-rigides (scénario murs 5)
- L'ouate de cellulose en vrac à insuffler (scénario murs 4)

Les panneaux rigides sont à proscrire dans le cas d'une ossature car ils nécessitent un grand nombre de découpes et génèrent beaucoup de ponts thermiques.

Beaucoup d'autres choix sont possibles pour les isolants sous forme de panneaux rigides et semi-rigides. Mais pour conserver un nombre raisonnable de scénarios, seuls ceux pour lesquels j'ai pu obtenir suffisamment d'informations sur les prix et performances environnementales (fiches EPD) sont intégrés dans ce travail. Certains types d'isolant semi-rigides ne sont pas utilisés pour les murs mais peuvent être retrouvés en toiture.

Pour les revêtements de façades, la finition la plus simple et la moins coûteuse sera toujours un enduit. La technique traditionnelle est l'enduit à la chaux naturelle en trois passes. Aujourd'hui, les artisans lui substituent souvent des produits prêts à l'emploi, posés sur des treillis en plastique, car ils permettent la pose projetée. Ce type d'enduit est utilisé dans les scénarios de murs 1, 2, 3 et 6.

Le bardage est une finition plus onéreuse : le coût du matériau brut est plus cher et la main d'oeuvre l'est également. En pratique, avant de poser les planches de bardage, on réalise un lattage et un contre lattage sur le pare-pluie de façon à créer une lame d'air ventilée pour accélérer son séchage. Les bardages en bois sont les plus fréquents (scénario 4). La pose verticale est idéale pour faciliter l'écoulement de l'eau et éviter les traces de coulures inesthétiques qui apparaîtront avec le temps. Il existe aujourd'hui des produits en fibre-ciment, nécessitant moins d'entretien et ne s'altérant pas esthétiquement dans le temps (scénario 5).

5.1.2 Scénario murs 1

Polystyrène insufflé + Panneaux de polystyrène + Enduit

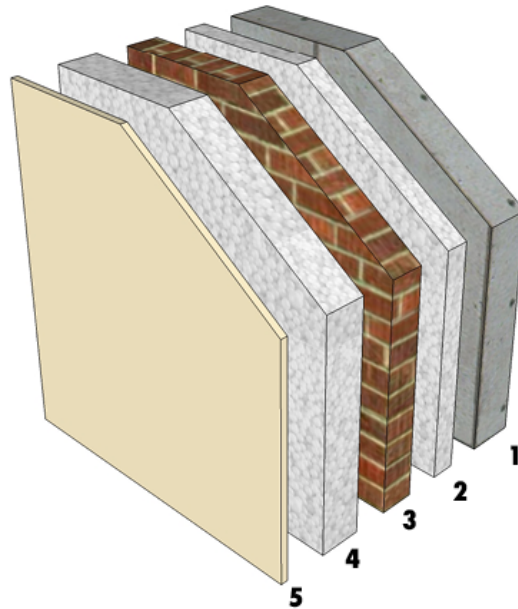


FIGURE 5.1 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 1.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W / mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Billes de polystyrène expansé	Nouveau	0.07	0.044
3	Brique de parement pleine	Existant	0.10	1.61
4	Panneau de polystyrène expansé	Nouveau	0.12	0.044
5	Enduit sur isolant	Nouveau	0.01	/
$U_{total} = 0.21$				

TABLE 5.1 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 1.

5.1.3 Scénario murs 2

Laine de verre insufflée KNAUF Supafil + Panneaux polyuréthane + Enduit

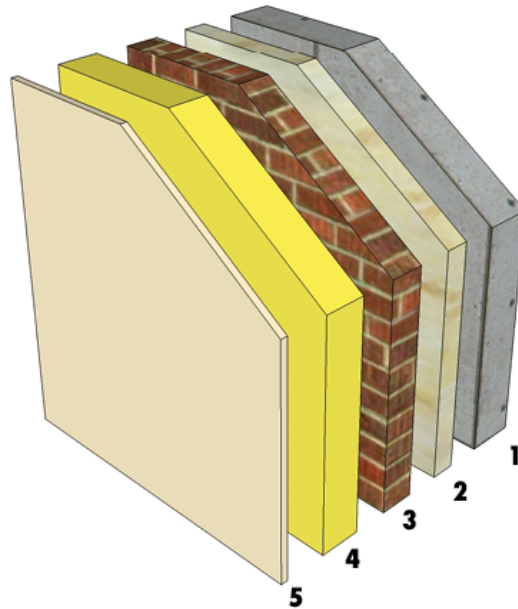


FIGURE 5.2 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 2.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W/mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Fibres de laine de verre insufflées	Nouveau	0.07	0.034
3	Brique de parement pleine	Existant	0.10	1.61
4	Panneau de polyuréthane	Nouveau	0.09	0.024
5	Enduit sur isolant	Nouveau	0.01	/
$U_{total} = 0.16$				

TABLE 5.2 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 2.

5.1.4 Scénario murs 3

Liège expansé en vrac + Panneaux de liège + Enduit

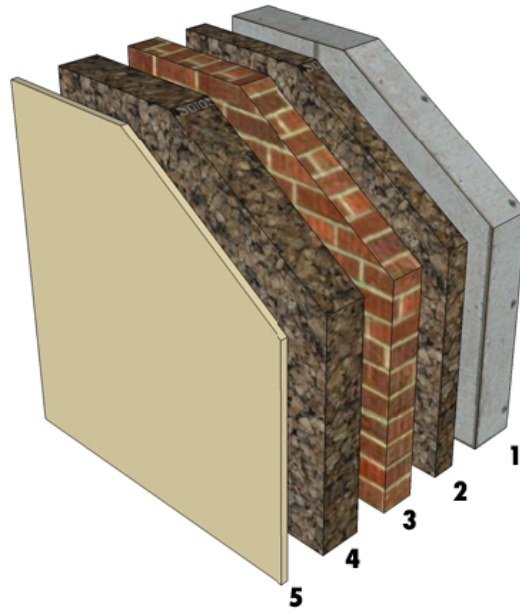


FIGURE 5.3 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 3.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W / mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Liège expansé en vrac	Nouveau	0.07	0.037
3	Brique de parement pleine	Existant	0.10	1.61
4	Panneau de polyuréthane	Nouveau	0.10	0.037
5	Enduit sur isolant	Nouveau	0.01	/
$U_{total} = 0.19$				

TABLE 5.3 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 3.

5.1.5 Scénario murs 4

Ossature bois + Cellulose insufflée ISOCELL + Bardage bois

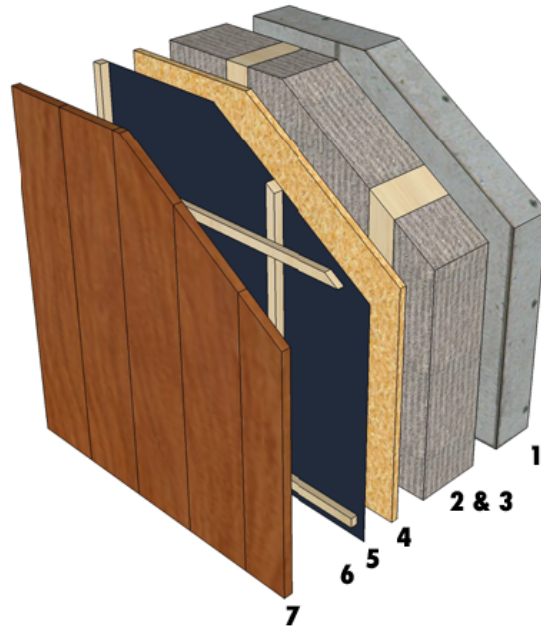


FIGURE 5.4 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 4.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W / mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Ossature bois contre maçonnerie	Nouveau	0.20	0.13
3	Cellulose insufflée	Nouveau	0.20	0.037
4	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
5	Pare-pluie PE	Nouveau	/	/
6	Sous-structure pour bardage	Nouveau	0.038	/
7	Bardage en bois	Nouveau	0.022	/
$U_{total} = 0.17$				

TABLE 5.4 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 4.

5.1.6 Scénario murs 5

Ossature bois + Laine de verre + Bardage fibro-ciment

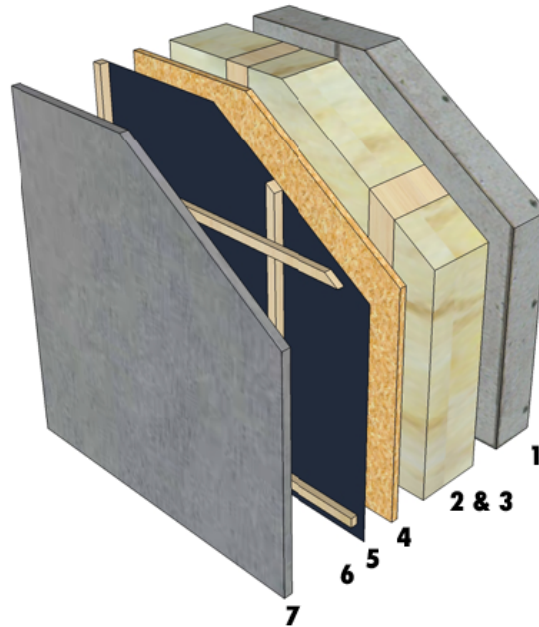


FIGURE 5.5 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 5.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W / mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Ossature bois contre maçonnerie	Nouveau	0.20	0.13
3	Laine de verre en panneaux semi-rigides	Nouveau	0.20	0.036
4	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
5	Pare-pluie PE	Nouveau	/	/
6	Sous-structure pour bardage	Nouveau	0.038	/
7	Bardage en fibro-ciment	Nouveau	0.022	/
$U_{total} = 0.17$				

TABLE 5.5 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 5.

5.1.7 Scénario murs 6

Panneaux EPS + Enduit

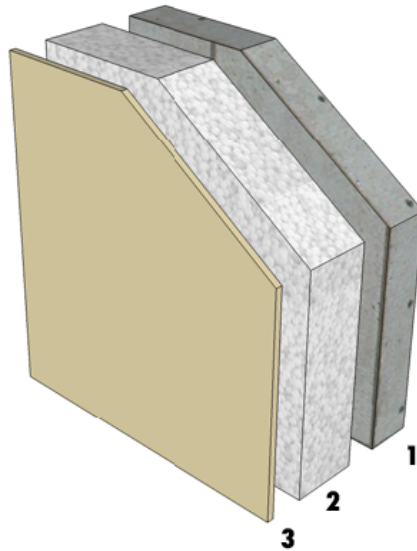


FIGURE 5.6 – Schéma de composition de paroi pour le scénario murs 6.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	$\lambda (W / mK)$
1	Bloc de béton léger	Existant	0.14	0.455
2	Panneau de polystyrène expansé	Nouveau	0.20	0.044
3	Enduit sur isolant	Nouveau	0.01	/
$U_{total} = 0.2$				

TABLE 5.6 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario murs 6.

5.2 Rénovation de la toiture

5.2.1 Considérations générales

Il est tout d'abord nécessaire de décider si la couverture existante doit être remplacée. Les entrepreneurs interrogés ne sont pas unanimes sur le sujet. La maison datant de 1960, les tuiles existantes ont aujourd'hui 60 ans. Elles sont encore en bon état mais elles se fragilisent d'année en année suite au gel/dégel et aux intempéries. Il sera de toute façon nécessaire un jour de les remplacer, alors pourquoi ne pas le faire dès maintenant à l'occasion des travaux d'isolation du bâtiment ? Néanmoins, nous ne considérerons pas le remplacement de la couverture existante dans ce travail afin de simplifier les calculs de l'analyse et du coût du cycle de vie.

Deux solutions permettent d'isoler thermiquement la toiture : par l'extérieur ou par l'intérieur. L'isolation par l'extérieur, aussi appelée méthode "sarking", permet de conserver la hauteur sous plafond sous les rampants. Cependant, dans notre cas, cela ne nous intéresse pas car les combles ne sont pas utilisés et que nous ne souhaitons pas remplacer la couverture. Nous faisons donc le choix de l'isolation par l'intérieur pour la toiture.

L'isolation par l'intérieur nécessite une couverture existante de bonne qualité. Pour éviter les éventuelles infiltrations de pluie ou de neige, il est nécessaire que celle-ci soit parfaitement étanche. La maison ne possède actuellement pas de pare-pluie, il sera donc nécessaire d'en placer un. Une mise en oeuvre peu commune, mais que l'on retrouve dans la rénovation des toitures par l'intérieur, est la pose d'une membrane pare-pluie par l'intérieur. En pratique, d'après les entrepreneurs interrogés, celle-ci est placée par dessous les chevrons et agrafée de façon à épouser la forme des chevrons et du voligeage.

L'isolation se placera entre les chevrons en suivant les rampants. Si l'on souhaite placer des épaisseurs d'isolant supérieures à 20cm, ce qui est le cas dans ce travail puisque nous plaçons 40cm, il est nécessaire de fabriquer des caissons en bois fermés par un panneau OSB. Cela entraînera une perte d'espace mineure dans les chambres mansardées. L'isolant sera mis en oeuvre en deux couches croisées de 20cm d'épaisseur chacune. Les matériaux qui peuvent être utilisés pour une isolation intérieure en toiture existent sous forme de panneaux semi-rigides. Dans notre étude, on considérera :

- Les laines minérales en panneaux semi-rigide : laine de verre et laine de roche (scénario toiture 1 et 2)
- Les laines d'origine végétales en panneau semi-rigide : laine de bois, laine de chanvre et le GRAMMITHERM, un isolant à base d'herbe de prairie (scénario toiture 4, 5 et 6)
- L'ouate de cellulose en vrac à insuffler (scénario murs 4)

Ce type d'isolation sous forme de matelas est bien adapté pour isoler par l'intérieur car celui-ci se glisse facilement entre les chevrons existants. L'isolant sous forme de panneaux rigides est à proscrire car il nécessite beaucoup de découpes et ne sera pas bien ajusté, ce qui créera des ponts thermiques. En

fonction du choix des isolants, il faudra mettre en oeuvre un frein-vapeur pour gérer la migration de la vapeur d'eau.

L'insufflation d'ouate de cellulose est une méthode de plus en plus populaire pour l'isolation par l'intérieur des toitures car elle est rapide et peu chère. En pratique, l'artisan fabrique des caissons étanches en structure bois et panneaux OSB sous la charpente. Un ou deux jours suffisent ensuite pour souffler de la ouate de cellulose et isoler l'entièreté de la toiture.

Une alternative encore plus économique serait de n'isoler que le plancher des combles et de fonctionner en toiture froide. L'espace des combles ne sera par contre plus utilisable. Nous ne considérerons pas cette possibilité dans cette étude.

5.2.2 Scénario toiture 1

Laine de verre 20+20cm

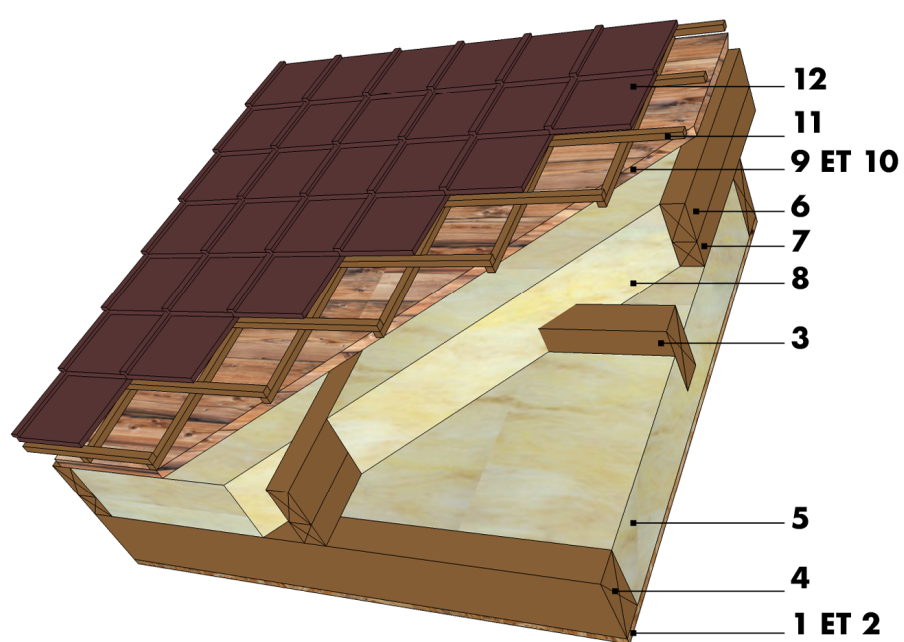


FIGURE 5.7 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 1.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	Laine de verre	Nouveau	0.20	0.036
6	Chevrans	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrans	Nouveau	0.08	0.13
8	Laine de verre	Nouveau	0.20	0.036
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.10$				

TABLE 5.7 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 1.

5.2.3 Scénario toiture 2

Laine de roche 20+20cm

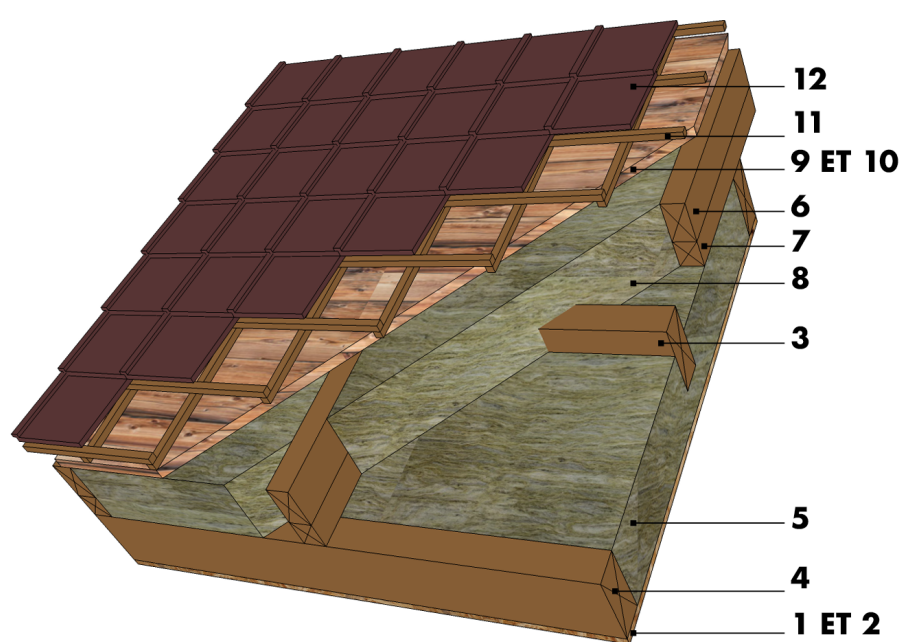


FIGURE 5.8 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 2.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	Laine de roche	Nouveau	0.20	0.036
6	Chevrans	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrans	Nouveau	0.08	0.13
8	Laine de roche	Nouveau	0.20	0.036
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.10$				

TABLE 5.8 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 2.

5.2.4 Scénario toiture 3

Cellulose insufflée ISOCELL 40cm

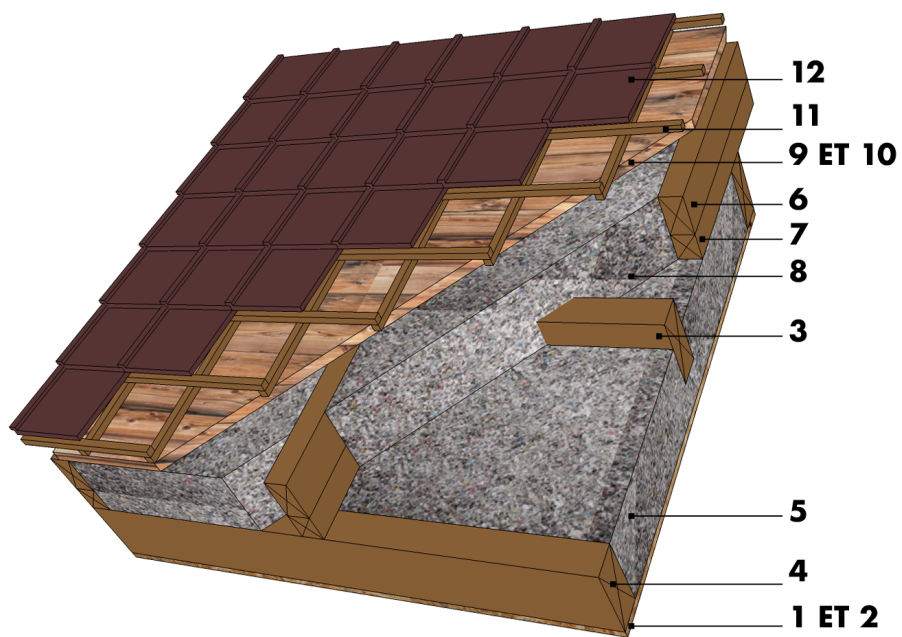


FIGURE 5.9 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 3.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	Ouate de cellulose ISOCELL	Nouveau	0.20	0.037
6	Chevrons	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrons	Nouveau	0.08	0.13
8	Ouate de cellulose ISOCELL	Nouveau	0.20	0.037
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.10$				

TABLE 5.9 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 1.

5.2.5 Scénario toiture 4

Laine de bois STEICOflex 20+20cm

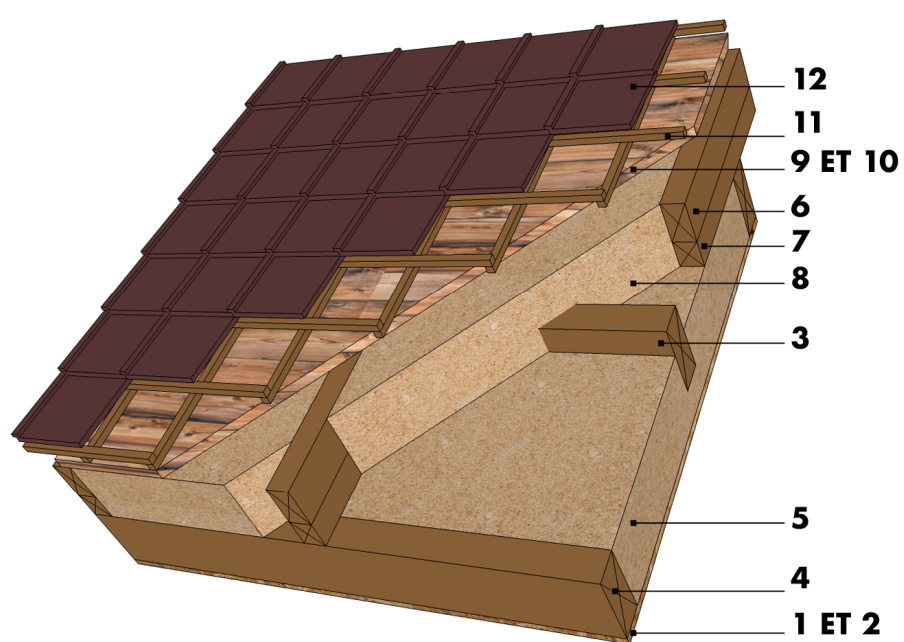


FIGURE 5.10 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 4.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	Laine de bois STEICOflex	Nouveau	0.20	0.037
6	Chevrans	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrans	Nouveau	0.08	0.13
8	Laine de bois STEICOflex	Nouveau	0.20	0.037
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.10$				

TABLE 5.10 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 4.

5.2.6 Scénario toiture 5

Laine de chanvre 20+20cm

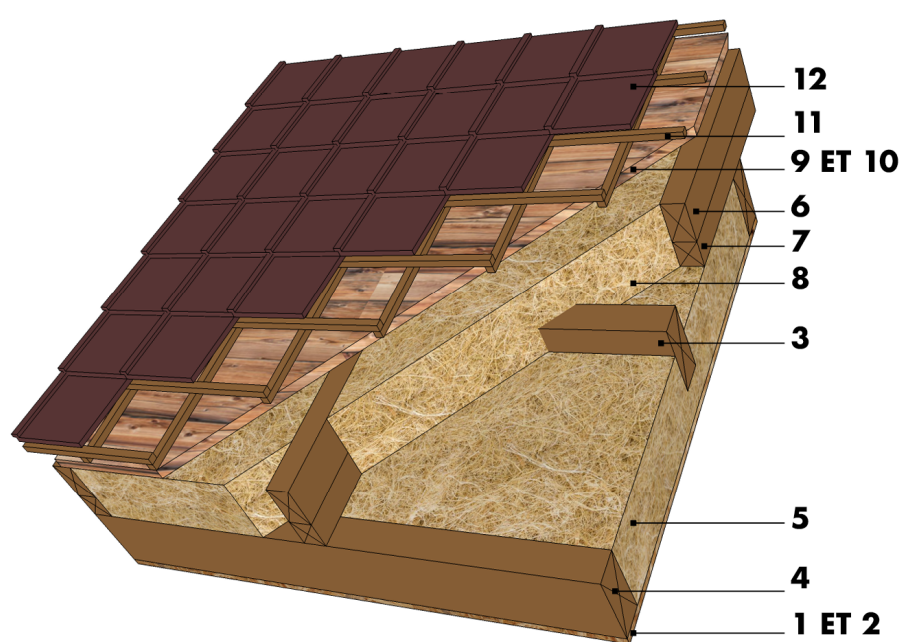


FIGURE 5.11 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 5.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	Laine de chanvre	Nouveau	0.20	0.040
6	Chevrans	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrans	Nouveau	0.08	0.13
8	Laine de chanvre	Nouveau	0.20	0.040
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.11$				

TABLE 5.11 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 5.

5.2.7 Scénario toiture 6

Isolant en herbe de prairie GRAMMITHERM 20+20cm

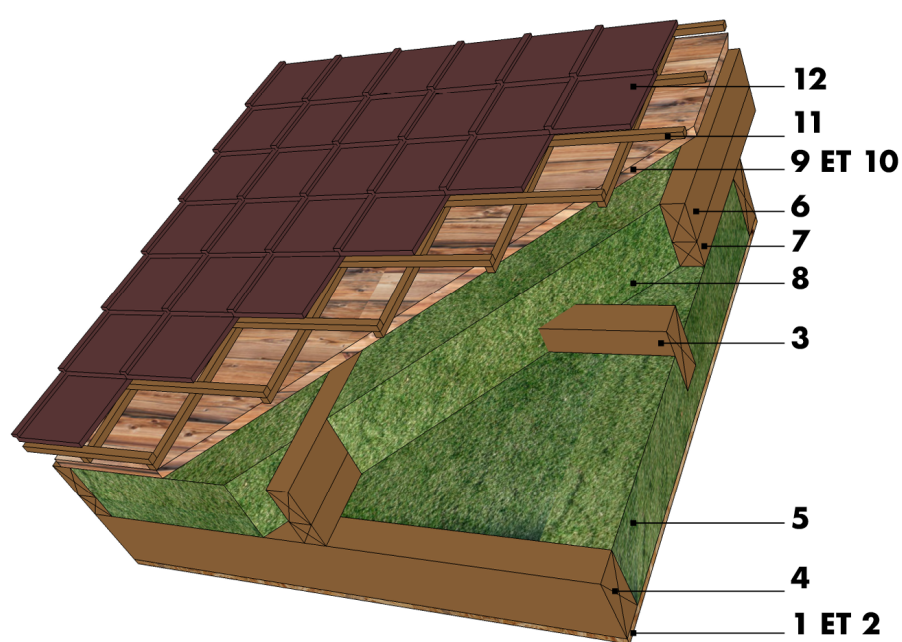


FIGURE 5.12 – Schéma de composition de paroi pour le scénario toiture 6.

N°	Matériaux	Statut	Épaisseur (m)	λ (W/mK)
1	Panneau OSB	Nouveau	0.018	0.13
2	Pare-vapeur PP	Nouveau	/	/
3	Pannes	Existant	0.20	0.13
4	Structure bois entre pannes	Nouveau	0.20	0.13
5	GRAMMITHERM	Nouveau	0.20	0.040
6	Chevrans	Existant	0.12	0.13
7	Contre-chevrans	Nouveau	0.08	0.13
8	GRAMMITHERM	Nouveau	0.20	0.040
9	Pare-pluie PE posé par l'intérieur	Nouveau	/	/
10	Voligeage	Existant	0.022	0.13
11	Lattage et contre-lattage	Existant	0.038	/
12	Tuiles tempêtes céramiques	Existant	0.03	/
$U_{total} = 0.11$				

TABLE 5.12 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario toiture 6.

5.3 Remplacement des fenêtres

5.3.1 Considérations générales

Les fenêtres existantes sont en simple vitrage et ne valent strictement rien au niveau thermique. Il est absolument nécessaire de les remplacer, au minimum par du double vitrage. La valeur U d'un double vitrage est de plus ou moins $1.0 \text{ W/m}^2\text{.K}$ et suffit à respecter les exigences PEB. C'est pourquoi nous en utiliserons dans le scénario fenêtres 1 et 2. D'après les dires des entrepreneurs, le triple vitrage apporte une amélioration mineure par rapport au double vitrage et coûte plus cher. Nous en utiliserons toutefois dans le scénario fenêtres 3.

Les menuiseries peuvent être réalisées avec trois types de matériaux, ainsi qu'un type mixte :

Châssis en bois : la solution traditionnelle. Le choix de l'essence est très important pour la durabilité.

Il est nécessaire d'entretenir le bois de façon régulière au moyen d'un vernis de finition (tous les 2 ans en moyenne). Il existe des procédés industriels permettant de le protéger pendant 10 ans. Bien entretenu, la durée de vie dépasse les 40 ans. Les menuiseries bois sont en général environ 20% plus chères que le PVC. Le châssis en bois est utilisé dans le scénario fenêtres 1.

Châssis aluminium : C'est la solution la plus coûteuse. Sa durée de vie est de plus de 60 ans. L'aluminium ne s'altère pas en étant exposé aux intempéries et ne nécessite donc pas d'entretien. Il est en revanche moins performant thermiquement par rapport au bois mais peut être amélioré grâce à l'intégration de coupures thermiques en matériau isolant. Il s'agit des menuiseries les plus chères. Le châssis en aluminium est utilisé dans le scénario fenêtres 2.

Châssis en PVC : la solution la moins chère. L'argument commercial classique est qu'il ne nécessite pas d'entretien. Pourtant, il n'est pas très durable car le PVC soumis aux UV devient cassant au bout de quelques années. Il doit être remplacé après 30 ans en moyenne. Il faut alors remplacer l'entièreté de la menuiserie. Le châssis en PVC est utilisé le scénario fenêtres 3.

Châssis mixte bois-alu : la solution la plus performante, aussi bien du point de vue thermique que du point de vue durabilité. Le bois offre la meilleure résistance thermique. Leur revêtement extérieur est en aluminium et ne nécessite donc aucun entretien. Il s'agit d'une solution optimale mais très coûteuse. Elle n'est pas considérée dans ce travail.

Le temps de travail pour le changement des châssis de la maison est d'environ une journée. Elles doivent être mises en oeuvre après la dépose du revêtement en brique extérieur, si l'on fait le choix de retirer les briques, mais avant la pose du nouvel isolant extérieur. Le châssis sera porté vers l'extérieur du mur pour être dans le même plan que la nouvelle couche d'isolation. Une attention particulière sera portée à la qualité de pose de l'isolation au niveau des encadrements de baies. Il faut prévoir des menuiseries avec des dormants plus larges afin de limiter les ponts thermiques et faciliter les raccordements d'étanchéité. Les appuis de fenêtres (pierre, béton ou aluminium) et seuils (pierre, aluminium, etc) sont à déterminer avant la pose. A l'intérieur, il faudra prévoir des raccordements type couvre-joint en bois ainsi que des tablettes en bois selon la finition esthétique souhaitée.

5.3.2 Scénario fenêtres 1

Châssis bois + Double vitrage

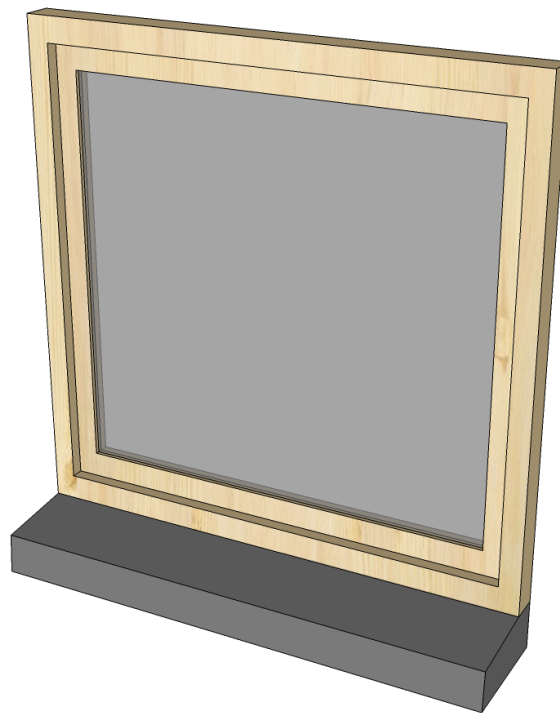


FIGURE 5.13 – Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 1.

Matériaux	Statut	U (W/m²K)
Châssis en bois tropical non traité	Nouveau	0.74
Double vitrage	Nouveau	1.1
$U_{total} = 1.06$		

TABLE 5.13 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 1. Les valeurs U des châssis et vitrage sont des valeurs génériques issues de TOTEM.

5.3.3 Scénario fenêtres 2

Châssis aluminium + Double vitrage

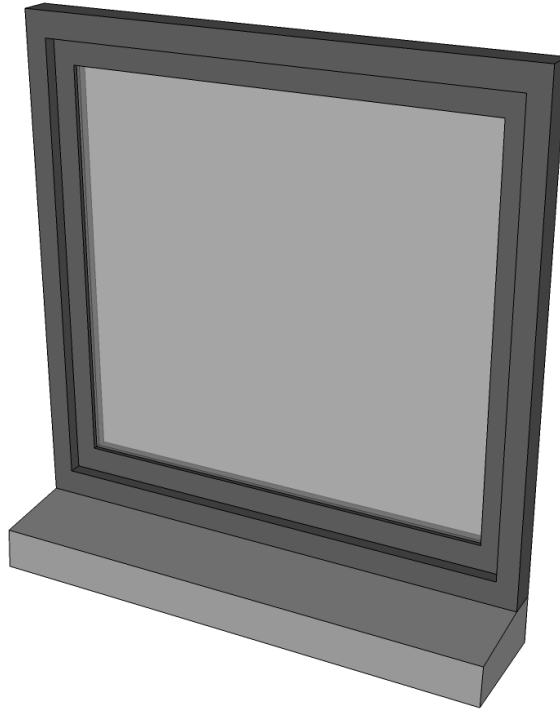


FIGURE 5.14 – Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 2.

Matériaux	Statut	U (W/m ² K)
Châssis en aluminium	Nouveau	1.26
Double vitrage	Nouveau	1.1
$U_{total} = 1.04$		

TABLE 5.14 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 2. Les valeurs U des châssis et vitrage sont des valeurs génériques issues de TOTEM.

5.3.4 Scénario fenêtres 3

Châssis PVC + Triple vitrage

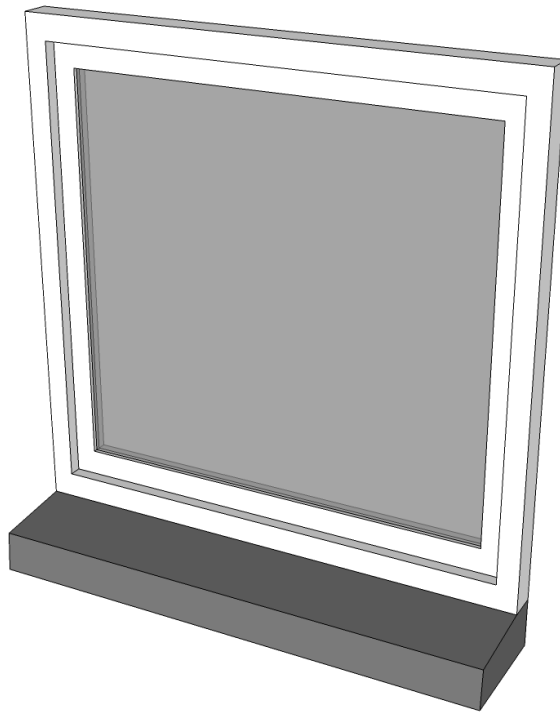


FIGURE 5.15 – Schéma de composition de paroi pour le scénario fenêtres 2.

Matériaux	Statut	U (W/m ² K)
Châssis en PVC	Nouveau	1.6
Triple vitrage	Nouveau	0.5
$U_{total} = 1.16$		

TABLE 5.15 – Composition et caractéristiques de la paroi pour le scénario fenêtres 3. Les valeurs U des châssis et vitrage sont des valeurs génériques issues de TOTEM.

6

Résultats - Rénovation des murs extérieurs

Dans cette section, nous détaillons les résultats de l'analyse du cycle de vie et du coût cycle de vie obtenus pour les scénarios de rénovation des murs présentés dans la section précédente. La durée de vie est fixée à 40 ans. Elle fait l'objet d'une analyse de sensibilité par la suite. Pour rappel, les résultats sont pondérés pour pouvoir être exprimés sous la forme d'un score unique agrégé pour l'ensemble des indicateurs environnementaux. La méthode de pondération choisie est la monétisation. L'impact environnemental est donc exprimés en euros, pour l'ensemble des murs. Cette somme représente le coût environnemental des externalités engendré par la rénovation. Ce coût n'est pas inclus dans le prix réel mais supporté par la société.

6.1 Résultats des scénarios de rénovation

6.1.1 Résultats de l'analyse du cycle de vie

Nous comparons tout d'abord sur la figure 6.1 la part de l'impact environnemental associé à l'énergie opérationnelle, l'énergie "blanche", relativement à celle associée à l'impact des matériaux, l'énergie "grise". La part moyenne de l'énergie grise varie entre 30 et 50% pour tous les scénarios, sauf pour le scénario 5 qui est à 70%. Dans tous les cas, nous sommes bien supérieurs à ce que l'on peut retrouver habituellement dans un bâtiment énergétiquement peu performant où ce rapport est plutôt de 10% d'énergie grise pour 90% d'énergie opérationnelle.

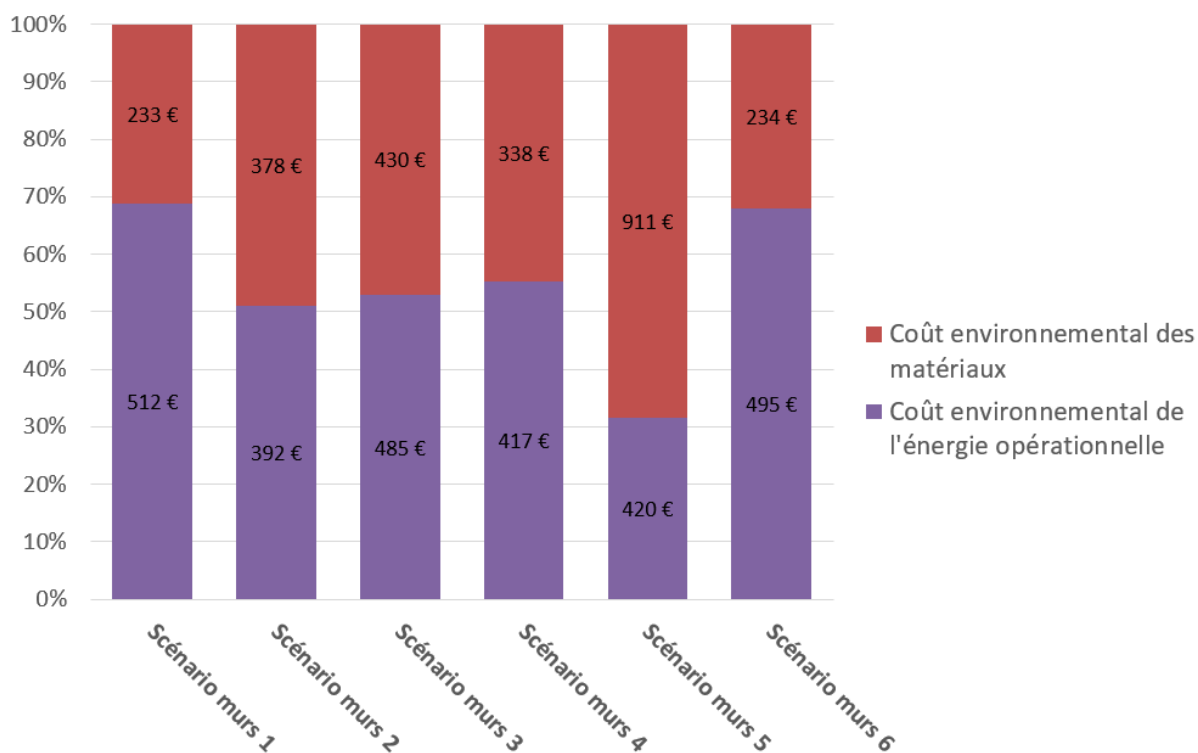


FIGURE 6.1 – Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation des murs.

La figure 6.2 montre le coût environnemental total pour les matériaux uniquement. Ce coût est détaillé selon les indicateurs d'impact. Le scénario 5, qui correspond à la laine de verre et au bardage fibrociment se démarque nettement des autres tant son coût est élevé. Les scénarios 1 et 6 sont les moins impactants. Ils ont recours au polystyrène expansé pour l'isolation. En général, le coût varie entre 200 et 500€ pour tous les scénarios de rénovation des murs. Au niveau des catégories d'impact, l'indicateur le plus représenté est le réchauffement climatique qui prédomine sur tous les autres. Sa part est encore plus importante pour le scénario 1 et 6, probablement car le polystyrène est d'origine pétrochimique. Vient ensuite l'eutrophisation, elle semble plus importante pour les scénarios ayant recours à des matériaux d'origine végétale comme le scénario 3 (liège), le 4 (bois pour l'ossature et bardage) et 5 (bois pour l'ossature). Enfin, on retrouve l'acidification. Les autres catégories d'impact sont marginales. Il faut retenir que la valeur monétaire attribuée à chaque indicateur a beaucoup d'influence sur les résultats présentés ici.

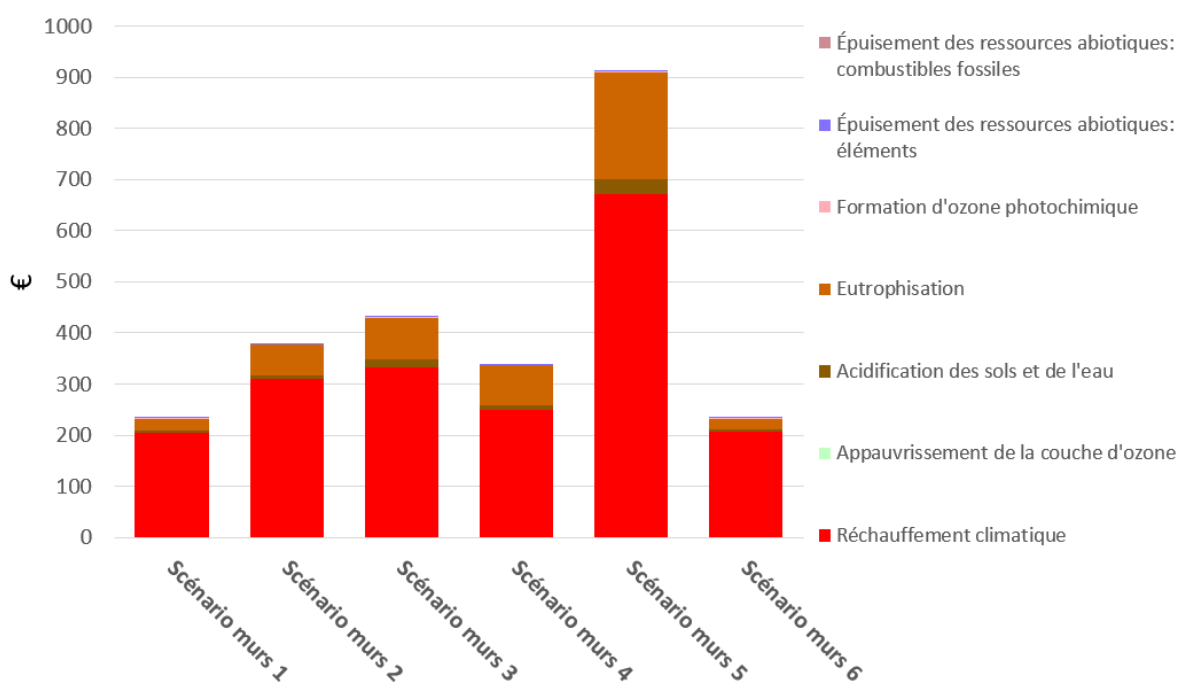


FIGURE 6.2 – Coût environnemental des matériaux par indicateur d’impact pour les scénario de rénovation des murs.

Si nous étudions ensuite le coût environnemental par phases du cycle de vie sur la figure 6.3, c’est la phase opérationnelle avec l’énergie qui se démarque. Elle est plus ou moins la même pour tous les scénarios, ce qui est logique puisque les parois ont sensiblement la même valeur U. Le scénario 5 est le plus impactant, la phase de production explique le coût environnemental plus élevé que pour les autres scénarios. La phase de production pour le scénario 3 qui utilise du liège est plus impactante que pour ceux avec des matériaux synthétiques. L’impact de phase de construction est toujours très faible. Pour les scénarios possédant un bardage en façade, comme le scénario 4 et 5, le remplacement de ceux-ci au cours de la durée de vie (après 30 ans) n’est pas sans incidence et alourdit considérablement leur bilan. Les enduits aussi doivent être remplacés (après 20 ans) mais cela n’engendre pas autant d’impact. Les scénarios ayant recours aux isolants pétrochimiques (1, 2 et 6) engendrent un impact plus important en fin de vie pour l’élimination des déchets que les autres scénarios.

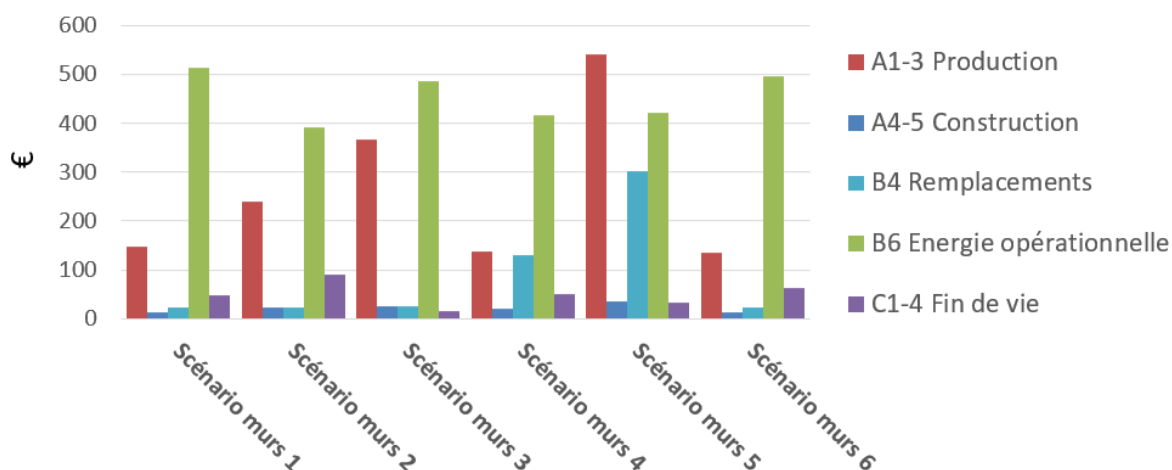


FIGURE 6.3 – Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation des murs.

La figure 6.4 illustre le coût environnemental des matériaux par m² mis en oeuvre. Les remplacements ne sont pas considérés ici. Le bardage fibrociment engendre le coût environnemental le plus élevé. La production du ciment étant très polluante (CO₂ relâché par la réaction chimique et émissions pour la cuisson) ce résultat n'étonne guère.

Dans le scénario 2, le polyuréthane est responsable de la quasi-totalité de l'impact, alors que la laine de verre insufflée n'engendre quasiment pas d'impact. Il me semble que cela s'explique car le polyuréthane est d'origine pétrochimique et relâche de grandes quantités de gaz à effet de serre s'il est incinéré en fin de vie.

Le liège expansé est assez impactant alors que pourtant c'est un matériau d'origine naturelle. Il y a probablement plusieurs raisons à cela. Le chêne-liège ne pousse pas dans nos régions et son écorce doit être importée (généralement du Portugal). Pour transformer ces granulats de liège brut en liège expansé, ceux-ci sont chauffés dans un four à autoclave. Cette opération engendre un impact environnemental important. Le liège expansé en vrac, lui, est un peu moins polluant car il n'est appliqué que dans une épaisseur de 7 cm au lieu des 10 cm du panneau, et sa mise en oeuvre sur site ne nécessite ni colles ni fixations. Enfin, il faut se souvenir que nous ne tenons pas compte dans ce travail de la séquestration de CO₂ par les matériaux bio-sourcés.

Étonnamment, le polystyrène s'en sort très bien puisque les scénarios 1 et 6 présentent les coûts environnementaux les plus faibles. Malgré mes recherches, je n'ai pas trouvé ce qui le rendait aussi intéressant au niveau environnemental. Peut-être est-ce dû au faible pourcentage de matière plastique nécessaire pour produire le matériau, qui est majoritairement composé d'air.

De façon générale, les isolants en vrac ont un coût environnemental bien plus faible que le même matériau sous forme de panneau. Ce qui se comprend car les matériaux en vrac nécessitent moins d'opérations de transformation en usine, contrairement aux panneaux qui utilisent des liants, fibres synthétiques

ou passe à la cuisson pour assurer leur consistance. Par ailleurs, ils sont appliqués dans une épaisseur plus faible (7 cm) donc en moins grande quantité. Sauf pour la cellulose qui elle est insufflée dans un caisson de 40 cm. Elle est donc l'isolant avec le meilleur bilan environnemental de tous les scénarios. Le second choix serait la fibre de verre insufflée KNAUF Supafil.

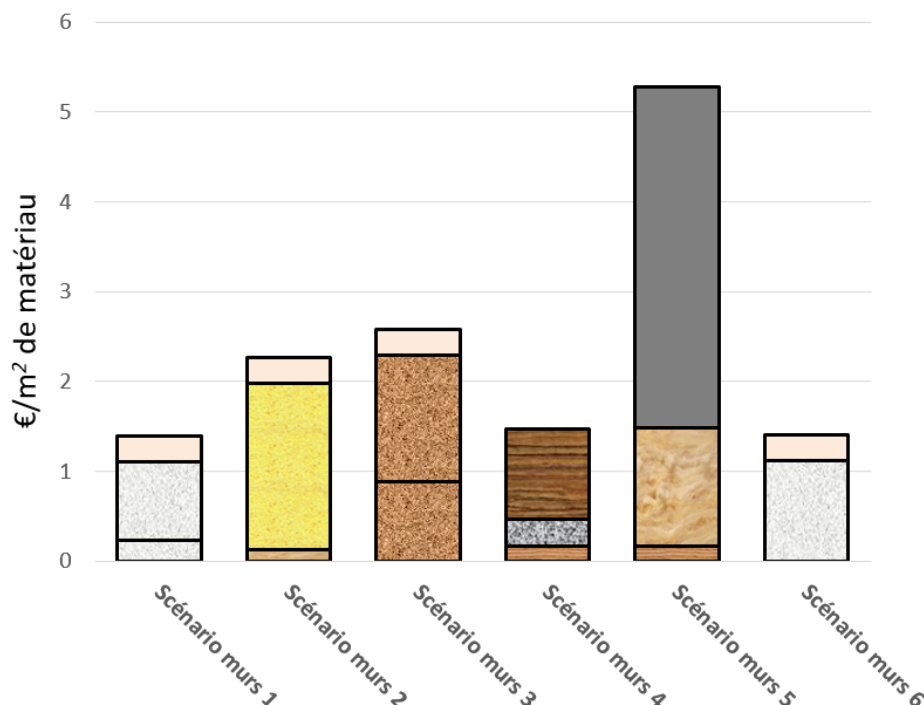


FIGURE 6.4 – Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation des murs. Matériaux des scénarios de murs, de bas en haut sur le graphique :

Scénario murs 1 - Billes de polystyrène expansé insufflées dans la coulisse + Panneau de polystyrène expansé + Enduit

Scénario murs 2 - Fibres de laine de verres insufflées KNAUF Supafil dans la coulisse + Panneau de polyuréthane + Enduit

Scénario murs 3 - Liège expansé en vrac insufflé dans la coulisse + Panneau de liège expansé + Enduit

Scénario murs 4 - Ossature bois + Ouatte de cellulose ISOCELL insufflée + OSB + Pare-pluie + Sous-structure de bardage + Bardage bois

Scénario murs 5 - Ossature bois + Panneau semi-rigide de laine de verre + OSB + Pare-pluie + Sous-structure de bardage + Bardage fibro-ciment

Scénario murs 6 - Panneau de polystyrène expansé + Enduit

6.1.2 Résultats du coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie pour la situation existante et pour la rénovation est calculé en considérant une durée de vie de 40 ans. Tous les coûts sont exprimés en valeur actuelle nette VAN avec un taux d'actualisation nominal de 0.74%, une croissance des prix annuelle de l'énergie de 3.18% et une croissance des prix de la construction de 2.27%.

Sur la figure 6.5, on constate que ce sont toujours les coûts d'investissement de départ pour les travaux de rénovation qui sont les plus importants. En fonction des scénarios, les coûts de remplacement peuvent devenir prohibitifs. Par exemple, dans le cas du remplacement du bardage dans les scénarios 4 et 5. Le coût de l'énergie après rénovation est faible. Les économies réalisées compensent donc très largement et sont toujours du même ordre puisque les parois possèdent sensiblement la même valeur U. Au final, les scénarios les plus intéressants du point de vue financier sont les scénarios 2 et 1.

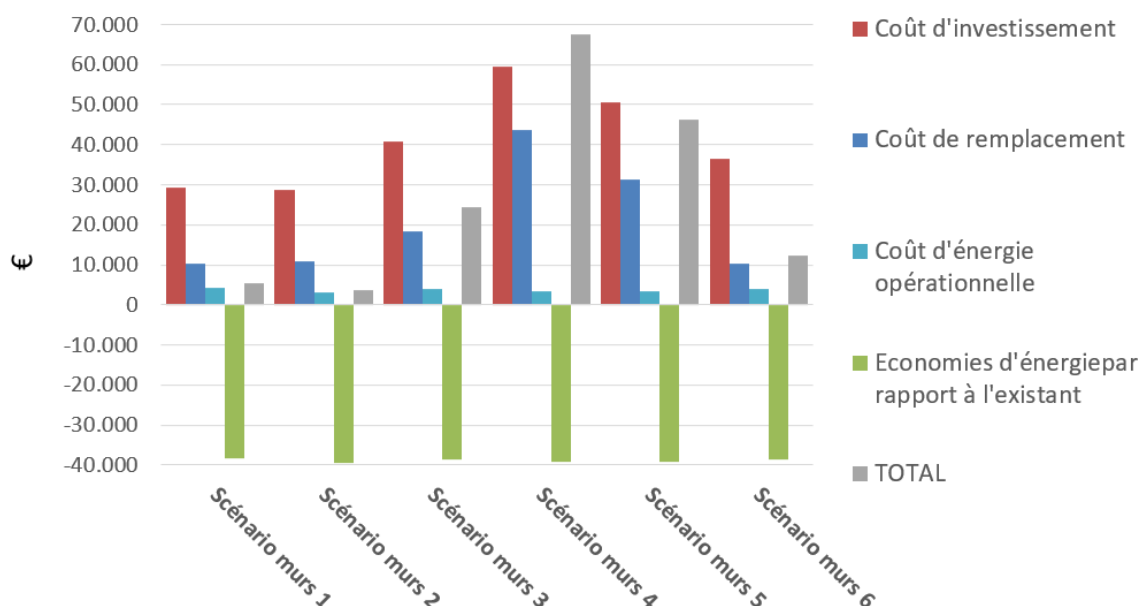


FIGURE 6.5 – Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation des murs.

Le matériau le plus coûteux d'entre tous est le bardage en bois comme constaté sur la figure 6.6. Pour le revêtement de façade, les enduits sont bien plus économiques. Les isolants en vrac utilisés en insufflation de coulisse sont très bon marché. L'isolation par insufflation est un procédé rapide et nécessitant peu de main d'oeuvre. Au point de vue du prix du matériau brut, les isolants en vrac sont généralement moins chers que leurs homologues sous forme de panneaux car ils nécessitent moins de transformation. C'est particulièrement le cas pour le liège en vrac. Le moins cher d'entre tous les matériaux est la cellulose ISOCELL. Par contre la cellulose nécessite de fabriquer des caissons en bois à insuffler, et on peut voir sur cette même figure 6.6 que le coût de fabrication de l'ossature n'est pas négligeable. La finition la plus évidente pour une ossature est le bardage, mais celui-ci est bien trop cher. De plus, avant toute chose il est nécessaire de démolir les briques pour ne pas engendrer trop de surépaisseur et pour rester protégé par le débord de toiture, ce qui engendre un surcoût. Il n'est pas possible d'utiliser la cellulose dans la coulisse car elle n'est pas imputrescible. Nous sommes donc dans une impasse. Le potentiel de la cellulose pour la rénovation des murs semble gaspillé. On se rabattra donc sur les billes de polystyrène ou les fibres de laine de verre dans la coulisse.

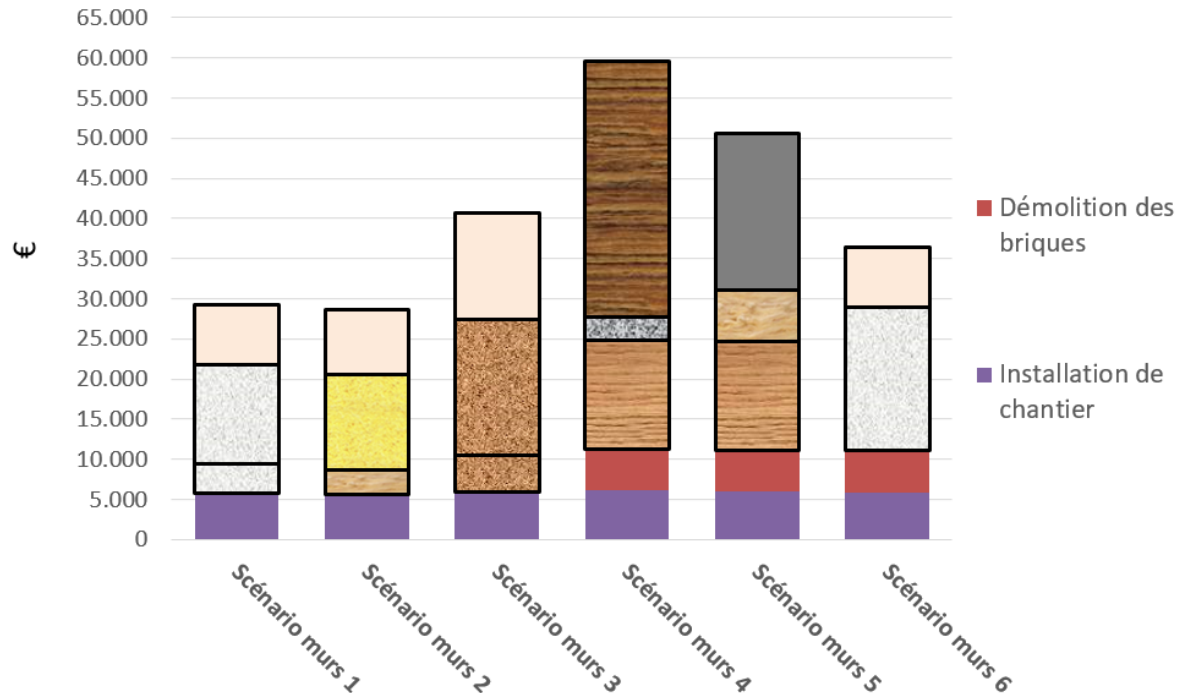


FIGURE 6.6 – Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation des murs. Matériaux des scénarios de murs, de bas en haut sur le graphique :

Scénario murs 1 - Billes de polystyrène expansé insufflées dans la coulisse + Panneau de polystyrène expansé + Enduit

Scénario murs 2 - Fibres de laine de verres insufflées KNAUF Supafil dans la coulisse + Panneau de polyuréthane + Enduit

Scénario murs 3 - Liège expansé en vrac insufflé dans la coulisse + Panneau de liège expansé + Enduit

Scénario murs 4 - Ossature bois + Ouatte de cellulose ISOCELL insufflée + OSB + Pare-pluie + Sous-structure de bardage + Bardage bois

Scénario murs 5 - Ossature bois + Panneau semi-rigide de laine de verre + OSB + Pare-pluie + Sous-structure de bardage + Bardage fibro-ciment

Scénario murs 6 - Panneau de polystyrène expansé + Enduit

6.2 Comparaison avec la situation existante

Nous poursuivons cette analyse avec la comparaison entre les scénarios de rénovation et la situation existante. Pour le coût environnemental tout d'abord sur la figure 6.7. Les économies environnementales sont toujours très importantes, quel que soit le scénario considéré. Elles varient entre -80 et -85% par rapport à la situation initiale. Le scénario 5 avec le coût environnemental le plus élevé, comme nous l'avons vu, réalise malgré tout des économies de -70%.

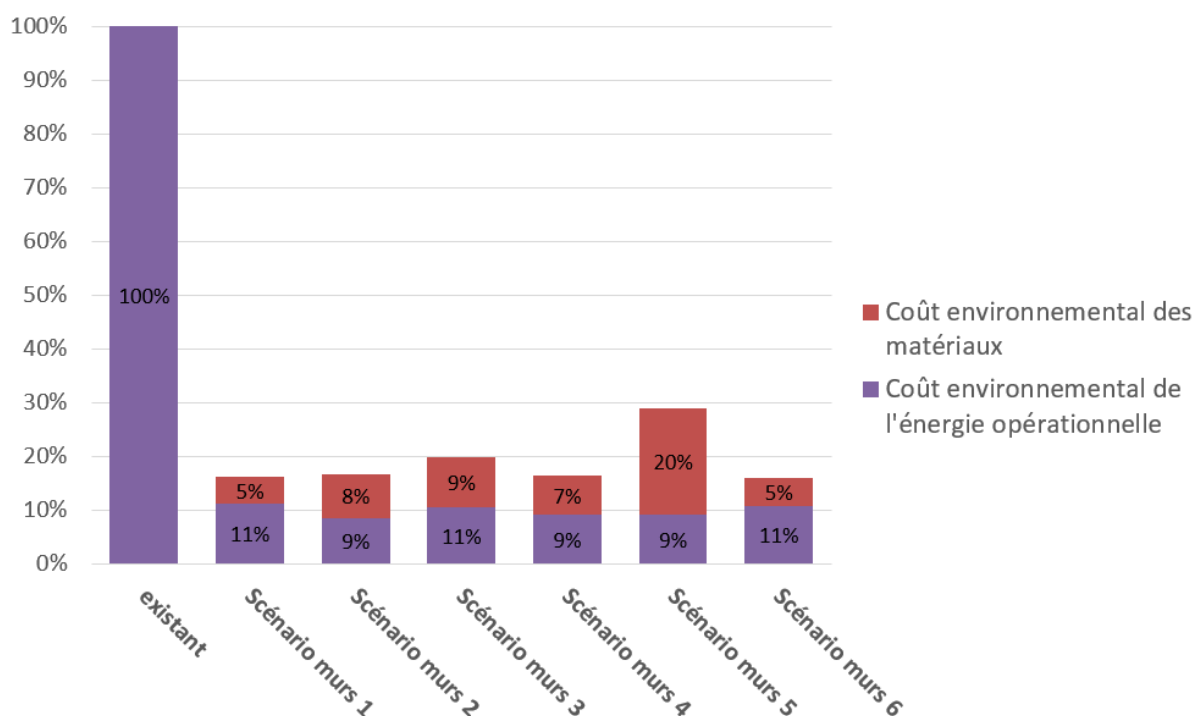


FIGURE 6.7 – Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs.

Le temps de retour sur investissement environnemental est défini comme étant le temps nécessaire pour que les économies d'énergie réalisées grâce à la rénovation compensent l'impact des nouveaux matériaux mis en oeuvre. Comme on peut le voir dans le tableau 6.1, celui n'excède jamais 6 ans, et avoisine plutôt 2 à 4 ans. Cela correspond à ce que l'on peut retrouver dans la littérature (Vilches 2016). C'est un retour sur investissement extrêmement rapide. Preuve en est que la rénovation est très rentable au niveau environnemental et permet de faire des économies environnementales considérables en peu de temps.

Temps de retour sur investissement environnemental (années)					
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
2.0	3.4	3.9	2.0	5.8	2.0

TABLE 6.1 – Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de murs.

Le coût financier présenté sur la figure 6.8 n'inclus pas les coûts de remplacements et de fin de vie, car ils sont considérés comme étant du même ordre de grandeur que ceux du cas existant. En premier lieu, on constate que c'est l'investissement de départ qui est responsable de la majeure partie du coût financier. Pour la majorité des scénarios, celui excède même le coût de la situation existante. Ces scénarios ne sont donc pas financièrement intéressants et coûtent plus chers que ce qu'ils rapportent. Et ce malgré les économies très importantes sur la facture d'énergie. Seuls les scénarios 1 et 2 réalisent des économies.

Sinon, le coût financier relatif à l'énergie opérationnelle chute d'environ 90% pour tous les scénarios. A nouveau, cela fait sens puisqu'ils possèdent la même valeur U.

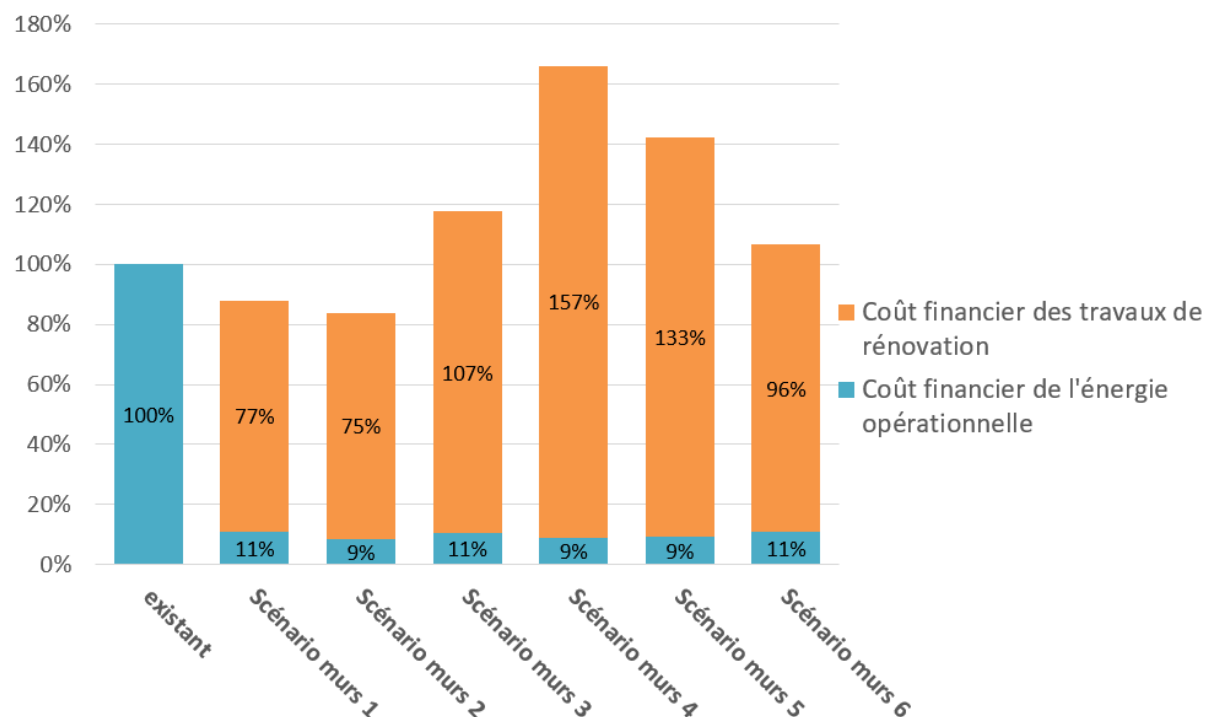


FIGURE 6.8 – Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs.

Le temps de retour pour les scénarios de rénovation des murs est assez long comme observé dans le tableau 6.2. Ce qui signifie que ceux-ci ne sont pas très rentables. Voir même déficitaires lorsque ce temps de retour est supérieur à la durée de vie de 40 ans comme c'est le cas pour les 2/3 des scénarios. A titre d'exemple, le scénario 2, le plus intéressant au niveau financier, réalise une économie de 4500 € sur 40 ans, ce qui est très peu.

Temps de retour sur investissement financier (années)					
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
36	35	44	55	50	41

TABLE 6.2 – Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de murs.

Grâce à la monétisation, il est possible de se faire une idée de l'ordre de grandeur entre le coût environnemental et le coût financier, puisque ceux-ci sont tous les deux exprimés en euros. Sur la figure 6.9, on remarque directement que le coût environnemental représente bien peu de chose face au coût financier, même pour la situation existante qui est désastreuse au niveau environnemental. Cette comparaison doit toutefois être relativisée, car ces coûts sont de nature très différente.

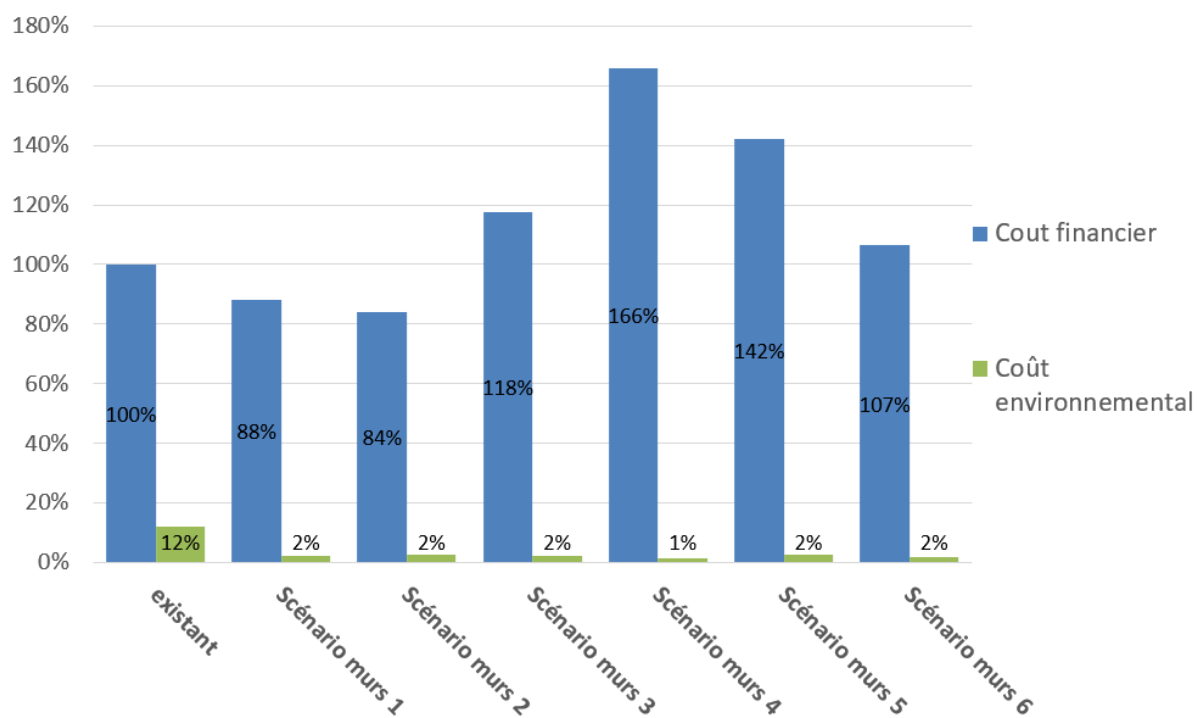


FIGURE 6.9 – Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation des murs.

6.3 Analyse de sensibilité sur la durée de vie

La durée de vie est maintenant fixée à 20 ans pour étudier la variabilité des résultats en modifiant l'hypothèse de départ. Sur une durée de vie de 20 ans, rénover reste très rentable du point de vue environnemental (figure 6.10). On passe d'économies de -80 à -85%, à -75 à -80%. Désormais, l'impact des matériaux représente plus de 50% pour tous les scénarios. Ce qui est logique puisque leur impact a intégralement lieu à l'année 0 contraire à l'énergie opérationnelle.

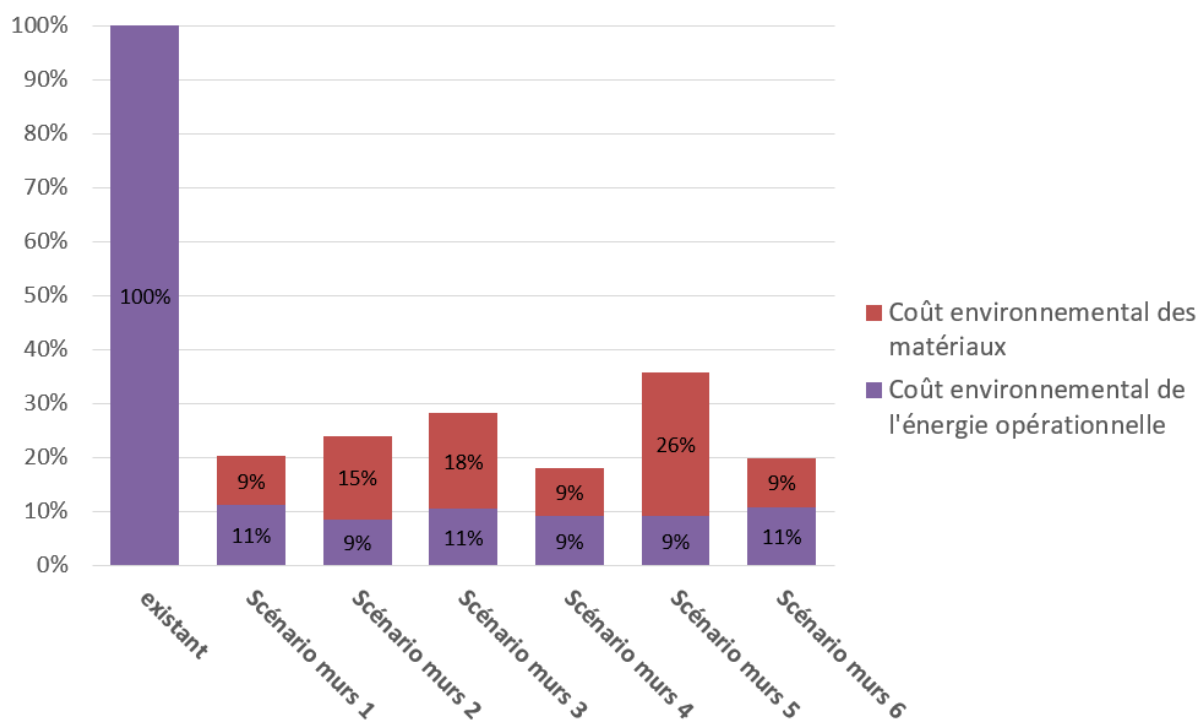


FIGURE 6.10 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

Du point de vue financier, plus aucun scénario de rénovation des murs n'est intéressant comme constaté sur la figure 6.11. Ils sont très déficitaires et entraînent des pertes de 2 à 4 fois du coût de la situation existante.

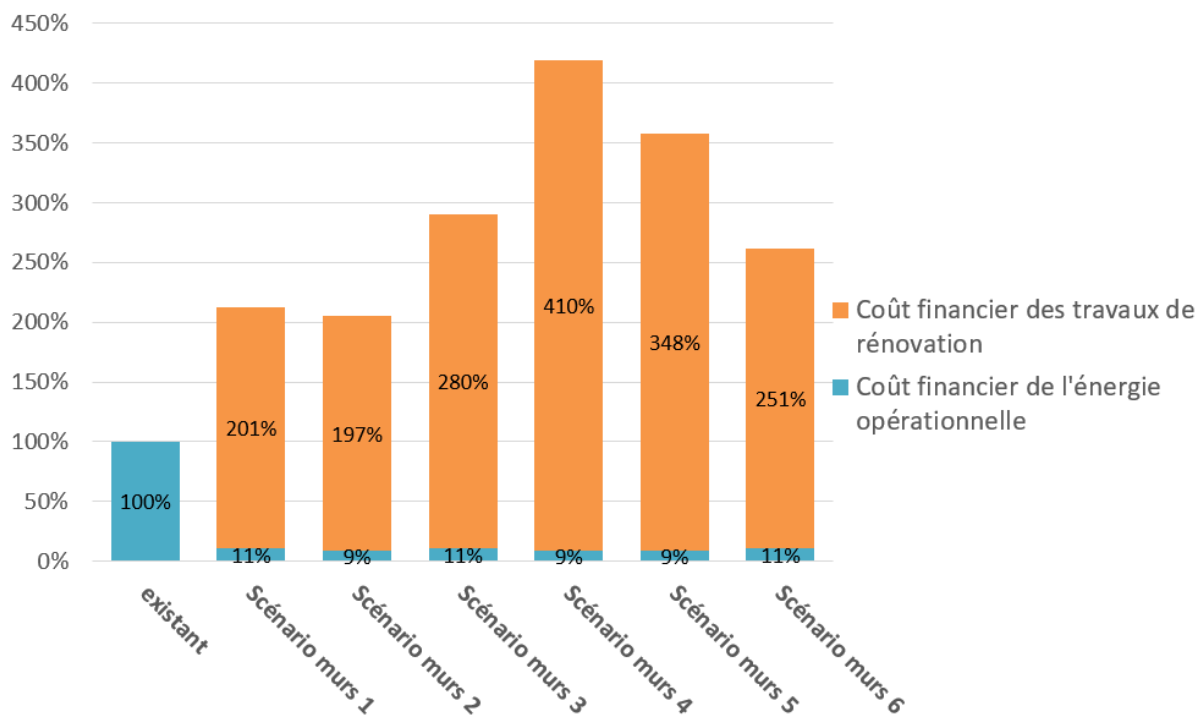


FIGURE 6.11 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

L'analyse de sensibilité ne modifie pas les conclusions tirées précédemment pour la comparaison entre le coût environnemental et le coût financier. Le premier reste marginal par rapport au second, même s'il augmente légèrement la situation existante (figure 6.12).

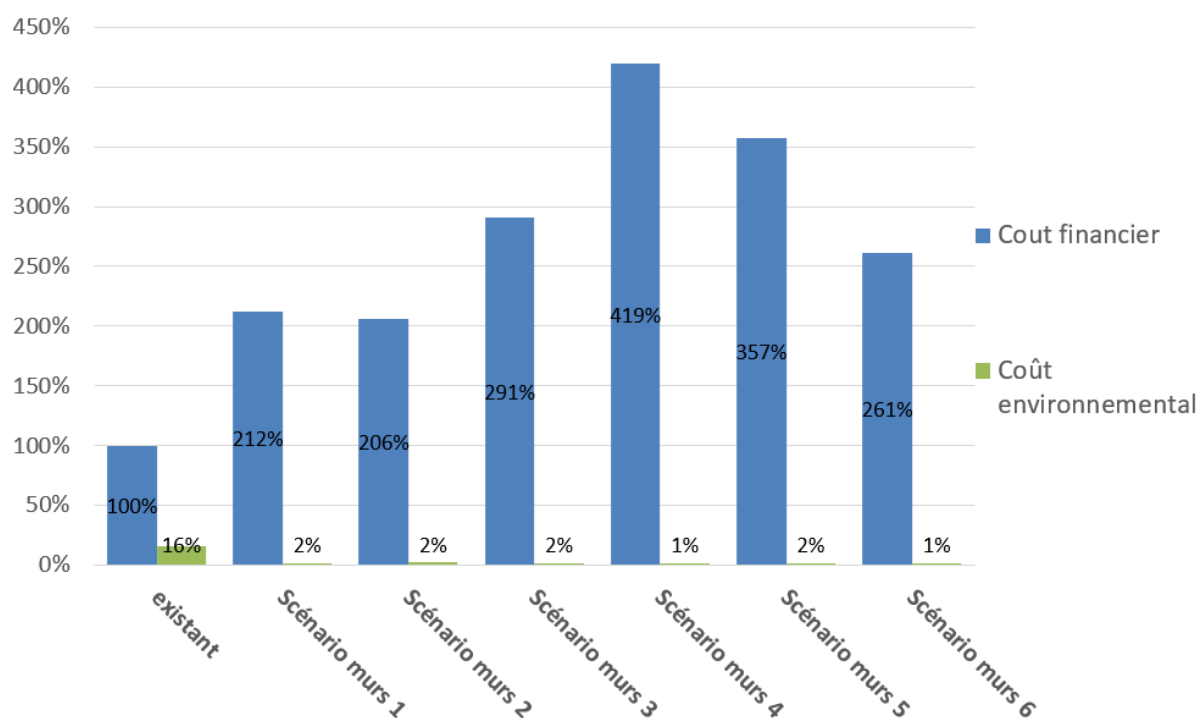


FIGURE 6.12 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

La durée de vie est maintenant de 60 ans. Cette hypothèse est réaliste, même si on considère généralement une durée de vie des bâtiments de 100 ans. En effet, rénover et entretenir un bâtiment a tendance à prolonger sa durée de vie.

Sur 60 ans, les économies sont toujours du même ordre que dans les situations précédentes, à savoir -80 à -85% (6.13).

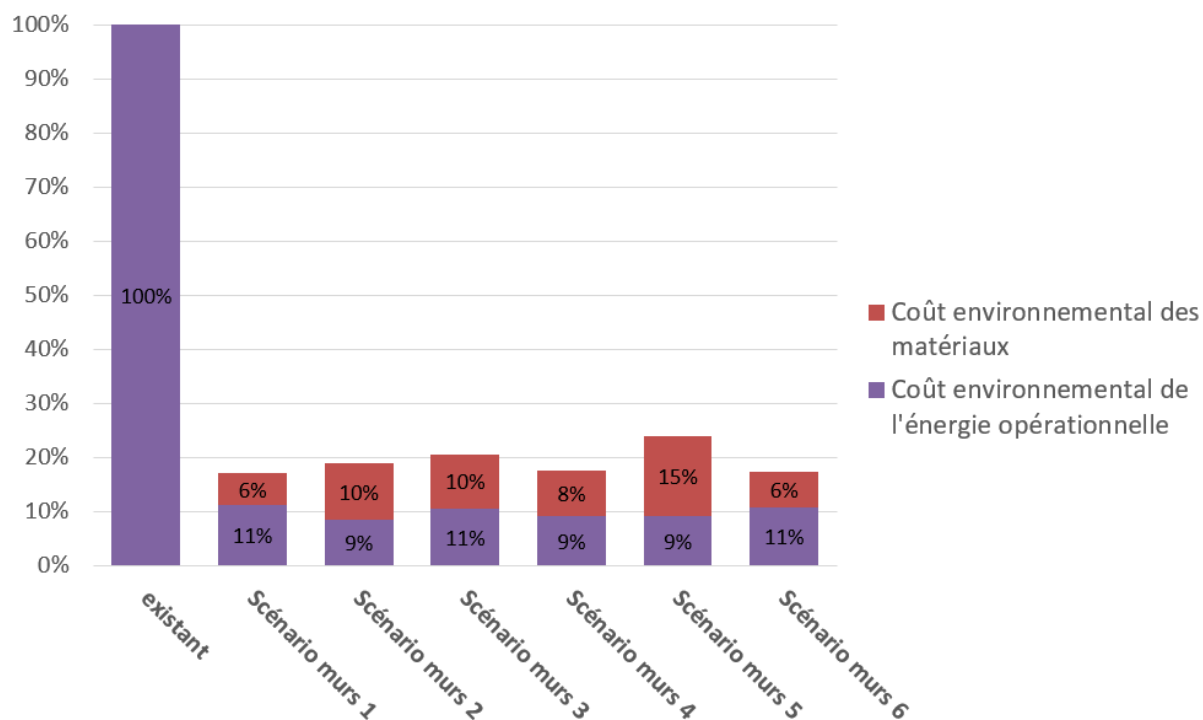


FIGURE 6.13 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

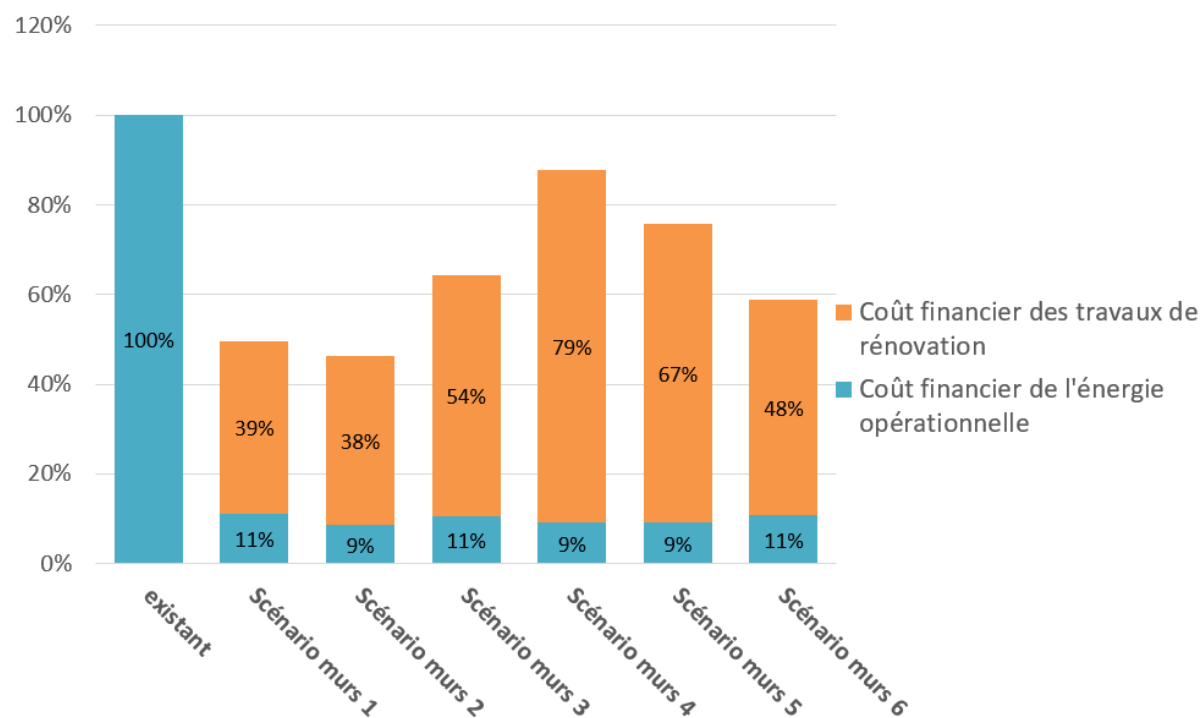


FIGURE 6.14 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

Par contre, sur une durée de vie de 60 ans, tous les scénarios deviennent plutôt rentables, même les plus coûteux d'entre eux financièrement comme observé sur la figure 6.14. Au cours du temps, l'investissement de départ se relativise vis à vis de l'énergie consommée et surtout de l'évolution du prix de celle-ci.

Le coût environnemental a tendance à augmenter légèrement (figure 6.15) car au-delà de 40 ans, il est nécessaire de réaliser à nouveau quelques travaux de rénovation légers pour remplacer les matériaux placés en année 0 et arrivés en fin de vie.

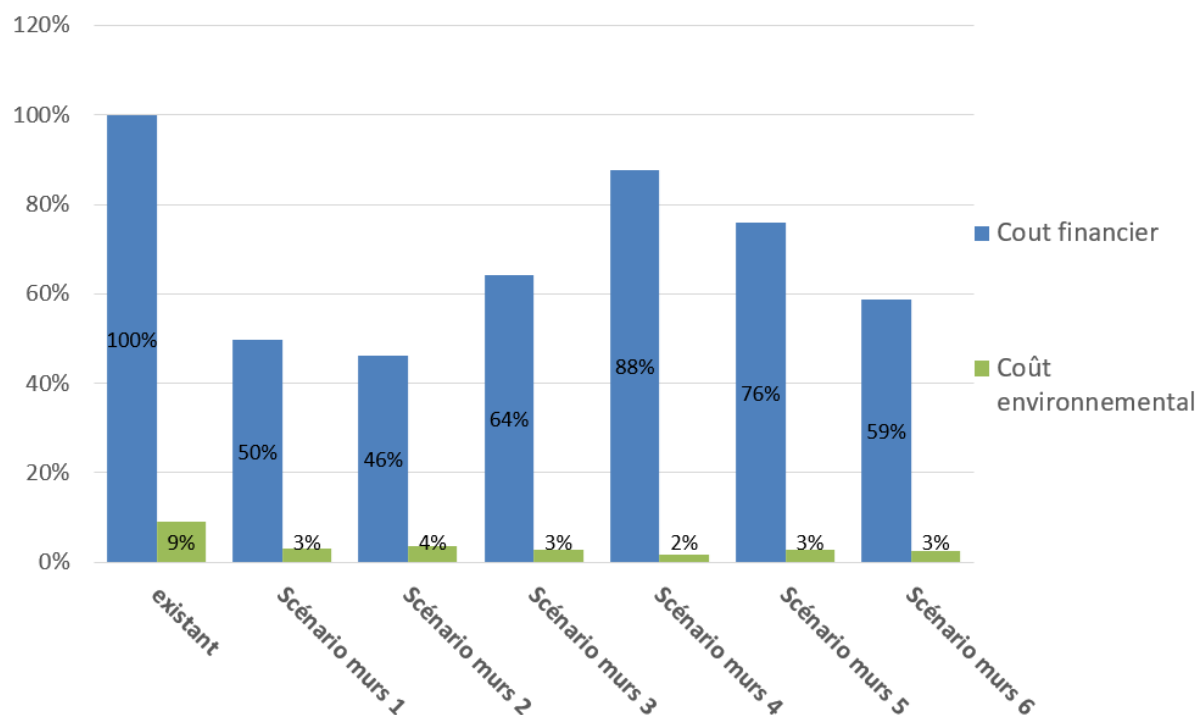


FIGURE 6.15 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

7

Résultats - Rénovation de la toiture

Dans cette section, nous détaillons les résultats de l'analyse du cycle de vie et du coût cycle de vie obtenus pour les scénarios de rénovation de la toiture. La durée de vie est fixée à 40 ans et fait l'objet d'une analyse de sensibilité en fin de section.

7.1 Résultats des scénarios de rénovation

7.1.1 Résultats de l'analyse du cycle de vie

Nous comparons tout d'abord sur la figure 7.1 la part de l'impact environnemental associé à l'énergie opérationnelle et à l'impact des matériaux. La part moyenne de l'énergie grise varie cette fois entre 50 et 70% pour tous les scénarios, ce qui est plus élevé que pour la rénovation des murs. Cette valeur est bien supérieure à ce que l'on peut retrouver habituellement dans un bâtiment énergétiquement peu performant.

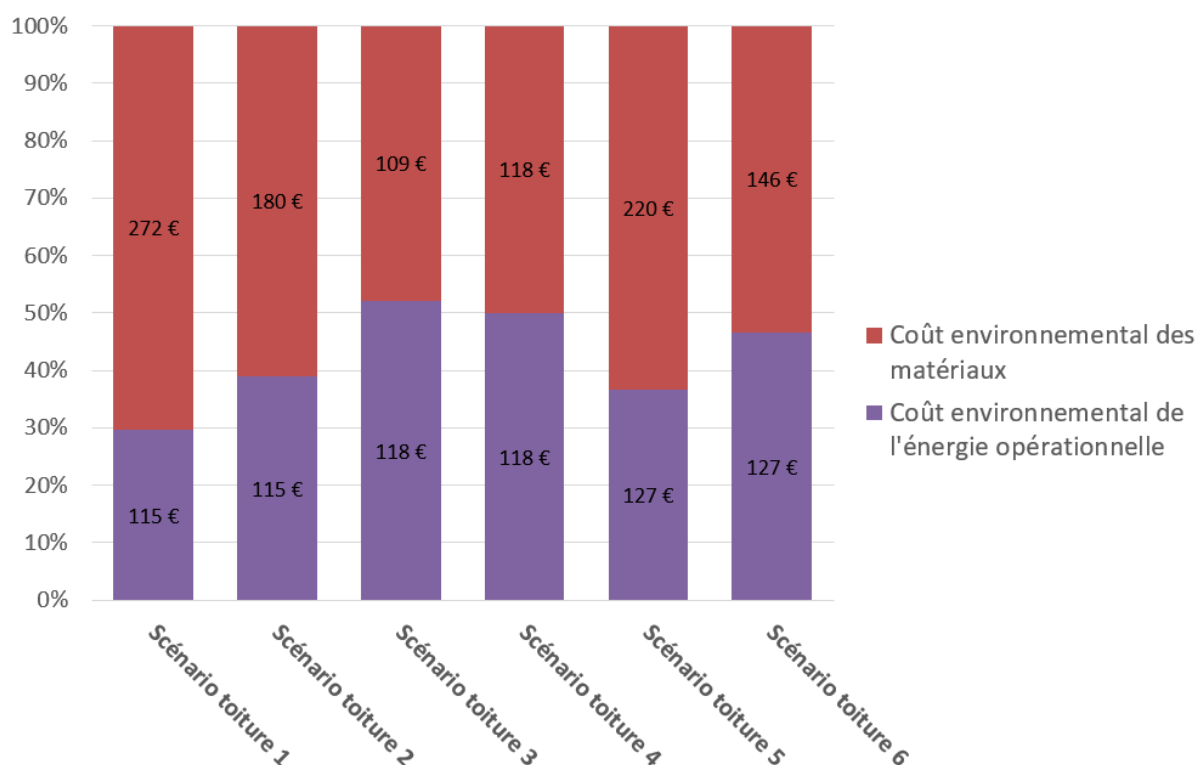


FIGURE 7.1 – Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation de la toiture.

Le coût environnemental total pour les matériaux est illustré sur la figure 7.2 selon les indicateurs d'impact. Le coût total varie entre 100 et 275 € environ. En comparaison, le coût pour les murs était de 200 à 500€. Seul le choix de l'isolant varie d'un scénario à l'autre, les différences de bilan environnemental entre les scénarios résultent donc de ce choix. Le scénario 1, correspondant à l'isolation avec de la laine de verre, est plus impactant que les autres. Le scénario avec le meilleur bilan environnemental est le scénario 3, c'est à dire celui utilisant à nouveau la cellulose ISOCELL comme isolant. Le réchauffement climatique est sans surprise la catégorie la plus représentée, suivi de l'eutrophisation et de l'acidification. Les scénarios se démarquent peu les uns des autres à ce niveau.

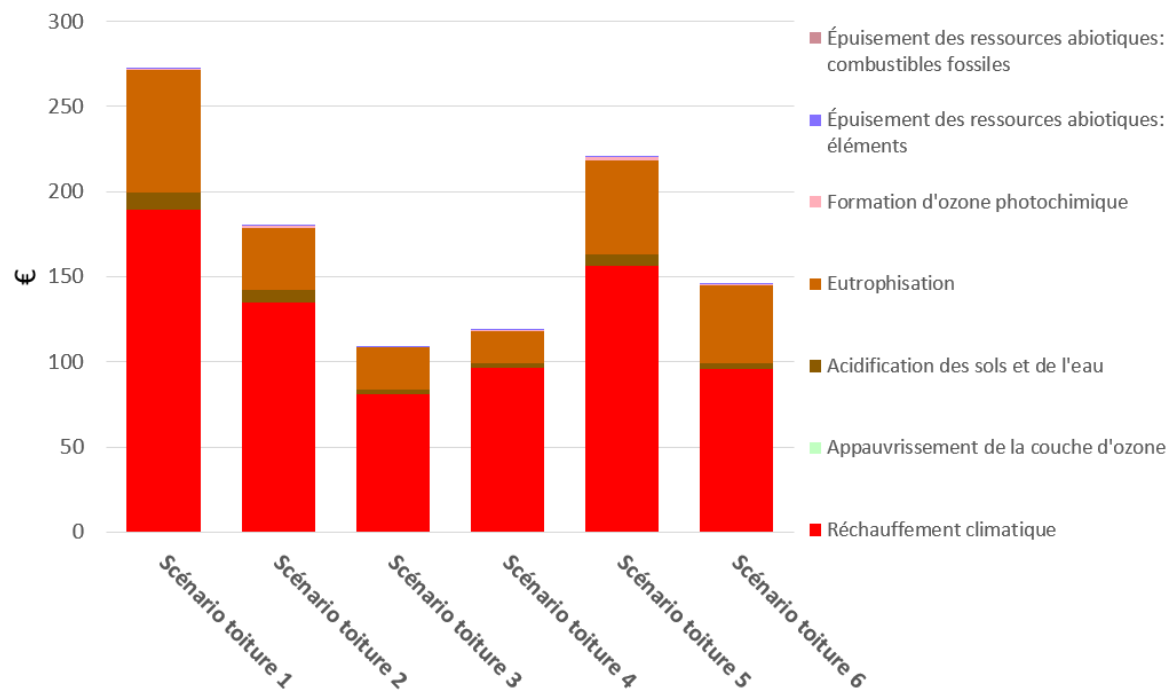


FIGURE 7.2 – Coût environnemental des matériaux par indicateur d’impact pour les scénario de rénovation de la toiture.

Nous étudions ensuite le coût environnemental par phases du cycle de vie sur la figure 7.3. Ce n’est plus la phase opérationnelle qui importe le plus mais bien la phase de production des matériaux. Probablement car les scénarios de rénovation de toiture possèdent une valeur U moyenne de 0.10, plus faible donc que pour les murs qui ont plutôt une valeur U de 0.20. Et les besoins en chauffage en sont d’autant réduits.

C’est la cellulose qui possède la phase de production avec le coût environnemental le plus faible. Cela s’explique quand on comprend le processus de fabrication. La cellulose est constituée de papier recyclé, finement broyé et mélangé à des sels minéraux (sel de bore et sulfate d’ammonium) pour assurer sa résistance au feu, aux insectes et lui donner des propriétés fongicides. J’ai pu visiter l’usine de production d’ISOCELL et me rendre compte que le processus de fabrication est simple et peu gourmand en énergie. Par contre, il est intéressant de constater que c’est la cellulose qui a la phase de fin de vie la plus impactante. Le sel de bore et le sulfate d’ammonium, même s’ils sont présents à l’état naturel, sont classés comme écotoxiques. Le commerce du sel de bore fut même interdit en Europe en 2011, avant de faire exception pour son utilisation dans certains domaines, dont la production de cellulose.

L’isolant à base d’herbe de prairie GRAMMITHERM a lui aussi une fin de vie plus délicate à gérer, comme le reflète son impact sur la figure 7.3. Celui-ci contient également des sels minéraux. Mais aussi des fibres de polyester mélangées à l’herbe et aux fibres de toiles de jute pour assurer la tenue du panneau. Il n’est donc pas compostable en l’état. Mais l’entreprise cherche à améliorer son matériau pour le rendre intégralement bio-sourcé.

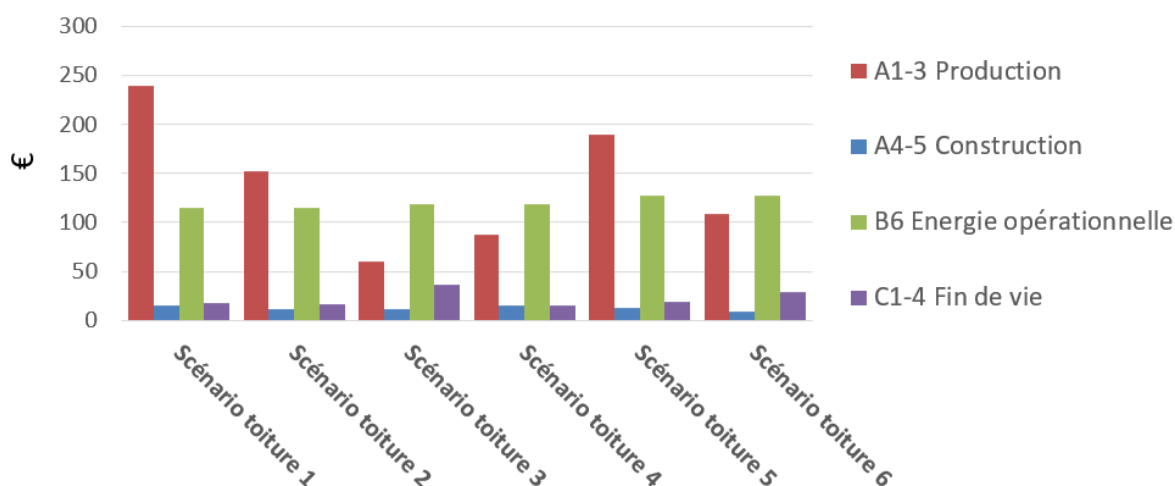


FIGURE 7.3 – Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation de la toiture.

Sur la figure 7.4, on constate que c'est le scénario 1, correspondant à l'isolation avec de la laine de verre, qui est plus impactant que les autres. Probablement car elle est produite à partir de verre recyclé qui doit être monté jusqu'au point de fusion pour être refondu, ce qui entraîne une grosse consommation d'énergie. La laine de chanvre est le second matériau le plus polluant, cela semble étrange car c'est pourtant un matériau d'origine bio-sourcé. Et même si TOTEM ne tient pas compte de la séquestration de CO₂, la culture du chanvre ne nécessite ni pesticides ni engrais et n'est donc pas très impactante. Le scénario avec le meilleur bilan environnemental est le scénario 3, c'est à dire celui utilisant la cellulose ISOCELL comme isolant. Il est suivi par le scénario utilisant la laine de bois STEICOflex.

Les panneaux d'OSB engendrent plus d'impact que la structure bois pour les caissons d'isolation. Alors que pourtant ils représentent une moins grande quantité en masse et en volume. Le procédé de transformation des copeaux en panneaux est néfaste pour l'environnement. De plus, l'OSB, bien que produit à partir de déchets de bois recyclés, utilise des colles qui entraînent l'émission de formaldéhyde qui est un gaz toxique.

Le pare-vapeur et la sous-toiture/pare-pluie sont en matière synthétique, produite à partir de pétrole, mais sont pourtant peu impactante dans le bilan total. Cela s'explique par leur très faible épaisseur.

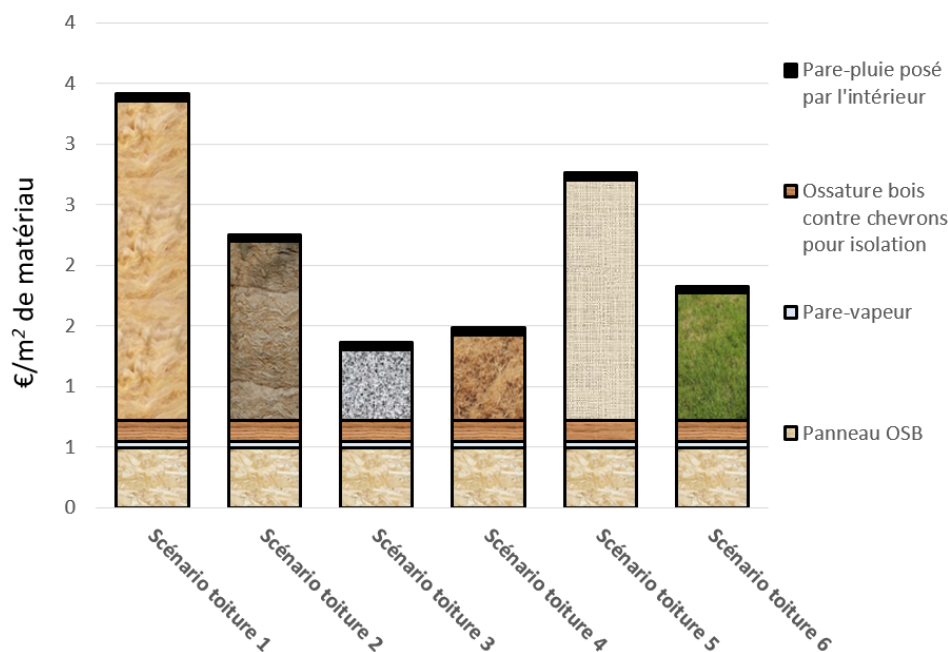


FIGURE 7.4 – Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation de la toiture. Matériau d'isolation des scénarios de la toiture :

Scénario toiture 1 - Laine de verre en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 2 - Laine de roche en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 3 - Ouatte de cellulose insufflée ISOCELL

Scénario toiture 4 - Laine de bois STEICOflex en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 5 - Laine de chanvre en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 6 - Herbe de prairie GRAMMITHERM en panneaux semi-rigides

7.1.2 Résultats du coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie pour la situation existante et pour la rénovation est calculé en considérant une durée de vie de 40 ans. Tous les coûts sont exprimés en valeur actuelle nette VAN avec un taux d'actualisation nominal de 0.74%, une croissance des prix annuelle de l'énergie de 3.18% et une croissance des prix de la construction de 2.27%.

Comme on peut s'en rendre compte sur la figure 7.5. C'est encore une fois le coût de l'investissement qui est déterminant pour les scénarios de rénovation de la toiture. Les coûts de l'énergie opérationnels sont faibles et les économies réalisées sur la facture d'énergie sont conséquentes, elles compensent presque le coût de l'investissement.

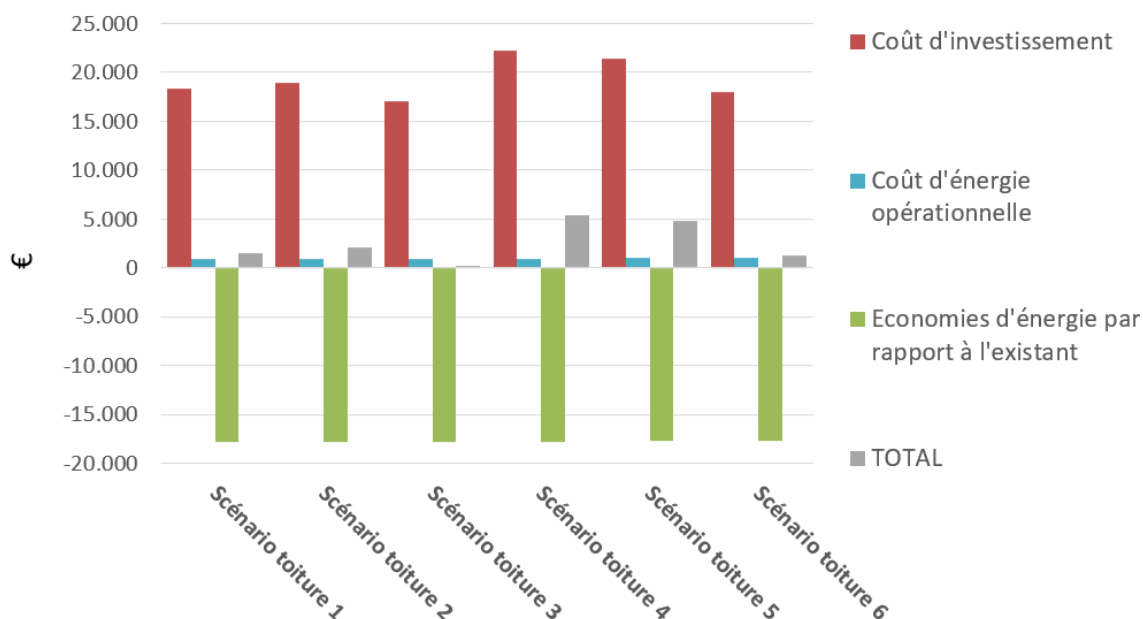


FIGURE 7.5 – Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de rénovation de la toiture.

Le coût le plus important revient à la fabrication de la structure en bois pour maintenir en place l'isolant sous les rampants de toiture comme illustré sur la figure 7.6. Celle-ci est nécessaire dans tous les scénarios, que ce soit pour les isolants sous forme de matelas en 20+20cm ou pour réaliser des caissons étanches pour insuffler la cellulose. L'importance du choix de l'isolant est donc relative dans le bilan financier global. Le coût des caissons est peut être disproportionné, il est de 89 €/m². Cette information provient d'un devis fourni par une des entreprises interrogée.

L'isolant le meilleur marché est à nouveau la cellulose ISOCELL, pour les mêmes raisons que vu précédemment pour les scénarios de mur. Cependant cette fois-ci, son utilisation en toiture trouve tout son sens : il est de toute façon indispensable de construire une structure bois, il n'y a pas besoin d'un revêtement extérieur comme un bardage et l'épaisseur d'isolation n'est pas une contrainte contrairement au cas précédent. C'est d'ailleurs la façon la plus fréquente de la mettre en oeuvre, et la plus réputée. Le GRAMMITHERM se démarque également en étant légèrement moins coûteux que les isolants en laine minérale. Le plus cher est la laine de bois, ainsi que la laine de chanvre.

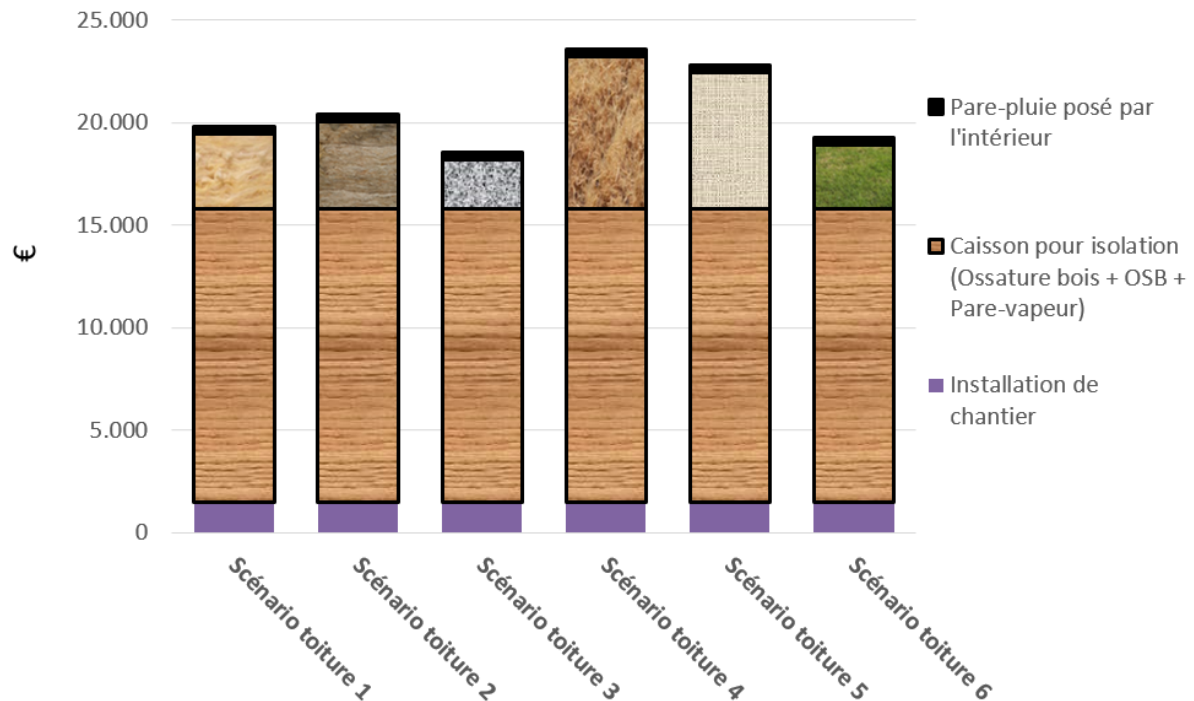


FIGURE 7.6 – Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de rénovation des murs. Matériau d'isolation des scénarios de la toiture :

Scénario toiture 1 - Laine de verre en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 2 - Laine de roche en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 3 - Ouatte de cellulose insufflée ISOCELL

Scénario toiture 4 - Laine de bois STEICOflex en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 5 - Laine de chanvre en panneaux semi-rigides

Scénario toiture 6 - Herbe de prairie GRAMMITHERM en panneaux semi-rigides

7.2 Comparaison avec la situation existante

Nous poursuivons cette analyse avec la comparaison entre les scénarios de rénovation et la situation existante. Pour le coût environnemental tout d'abord sur la figure 7.7. Les économies environnementales sont cette fois aussi très importantes, quel que soit le scénario considéré. Elles varient entre -80 et -90% par rapport à la situation initiale. La part de l'impact de l'énergie opérationnelle est plus faible que celle des matériaux.

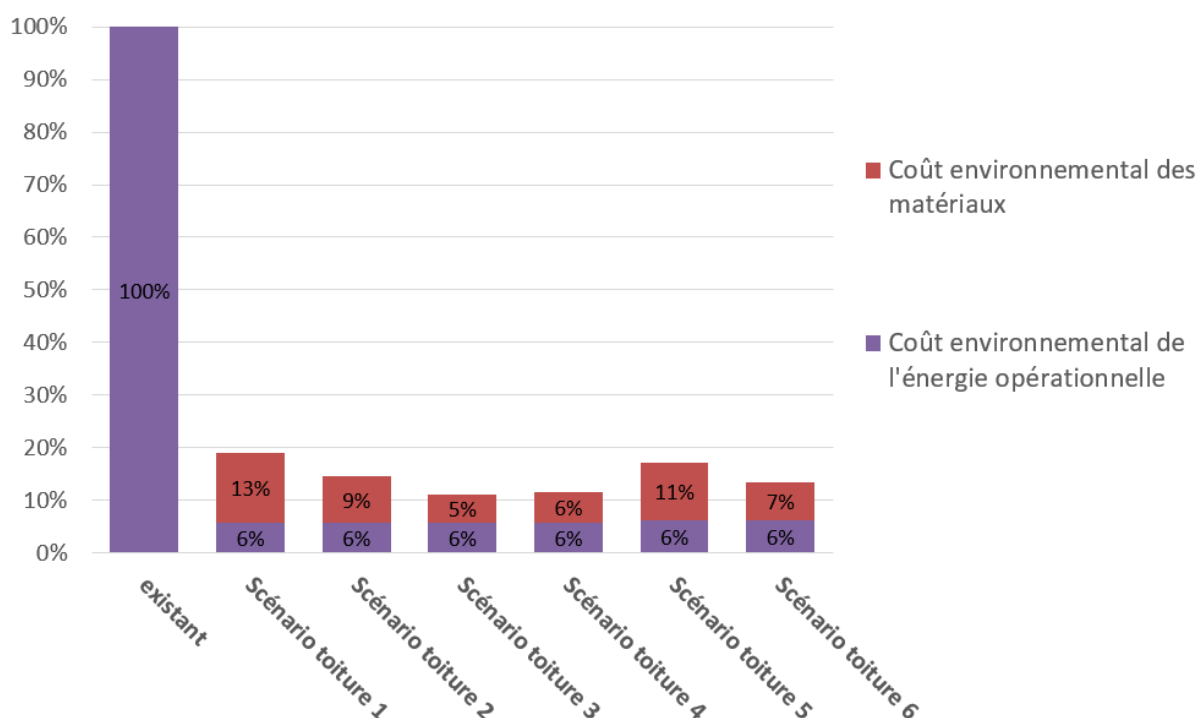


FIGURE 7.7 – Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture.

Comme on peut le voir dans le tableau 7.1, le temps de retour sur investissement environnemental n'est jamais supérieur à 6 ans, et varie plutôt autour de 3-4 ans. C'est très similaire aux résultats obtenus pour les murs et conforme à la littérature. La rénovation de la toiture est très rentable au niveau environnemental. Elle permet de faire des économies environnementales considérables en peu de temps.

Temps de retour sur investissement environnemental (années)					
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
5.7	3.8	2.3	2.5	4.6	3.1

TABLE 7.1 – Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de la toiture.

Le coût financier est présenté sur la figure 7.8. C'est encore une fois l'investissement de départ qui est responsable de la majeure partie du coût financier. Aucun des scénarios n'est rentable sur la période considérée de 40 ans. Même le scénario 3 à base de cellulose. Ils entraînent tous une perte évaluée entre 10% et 40% du coût financier de l'existant. L'investissement est trop important que pour justifier les économies réalisées.

La rénovation de la toiture est pourtant réputée pour être une opération rentable. Les résultats obtenus ici ne le reflètent pas. Une hypothèse pour expliquer ces résultats serait la valeur U de la toiture existante qui est de 1.7 W/m²K. Certes, elle est bien plus conséquente que la valeur U finale après rénovation

d'environ 0.1 W/m²K, mais elle est plus faible que pour les murs. Comme si la toiture d'origine était déjà faiblement isolée. Cette valeur de 1.7 W/m²K est issue des caractéristiques de l'archétype A défini dans l'étude de Attia S. et al. et présenté dans le chapitre 4.

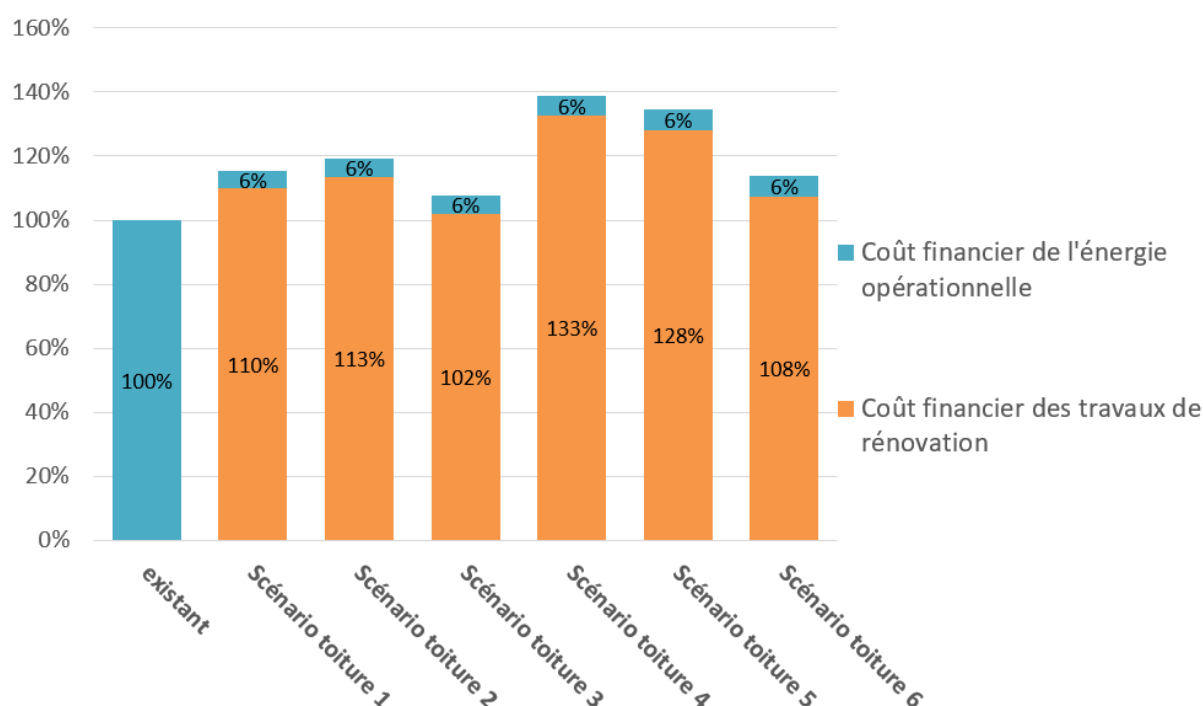


FIGURE 7.8 – Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture.

Les temps de retour pour les scénarios de rénovation de la toiture sont, cette fois également, assez longs (figure 7.2). Ceux-ci sont tous déficitaires puisque le temps de retour est supérieur à la durée de vie de 40 ans.

Temps de retour sur investissement financier (années)					
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
44	44	42	49	48	43

TABLE 7.2 – Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de la toiture.

Sans surprise, la figure 7.9 montre que le coût environnemental est très faible face au coût financier, même pour la situation existante. Cette comparaison doit toutefois être relativisée, car ces coûts sont de nature différente.

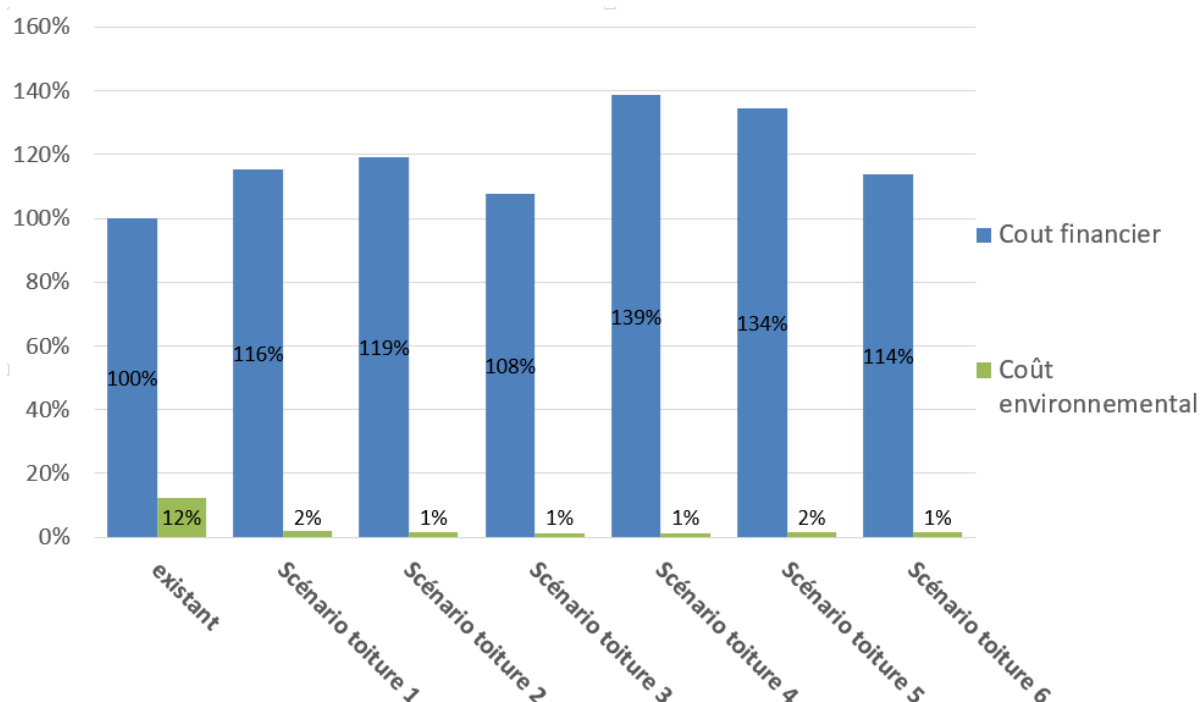


FIGURE 7.9 – Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation de la toiture.

7.3 Analyse de sensibilité sur la durée de vie

La durée de vie est maintenant fixée à 20 ans pour étudier la variabilité des résultats en modifiant l'hypothèse de départ. Sur une durée de vie de 20 ans, rénover reste tout à fait valable du point de vue environnemental (figure 7.10). Les économies sont un peu moins importantes que pour 40 ans, nous sommes aux alentours de -80 à -70%. L'impact des matériaux représente les 2/3 au plus pour tous les scénarios. Leur impact a intégralement lieu à l'année 0, alors que l'impact de l'énergie opérationnelle croît au fur et à mesure du temps.

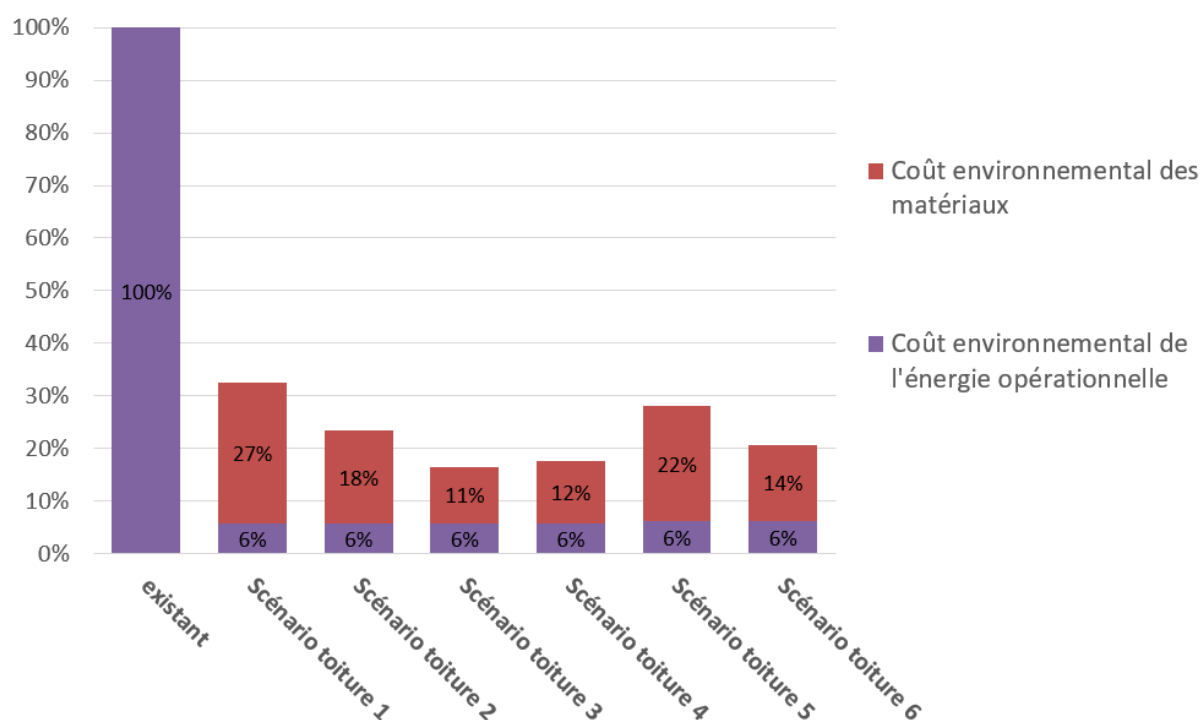


FIGURE 7.10 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

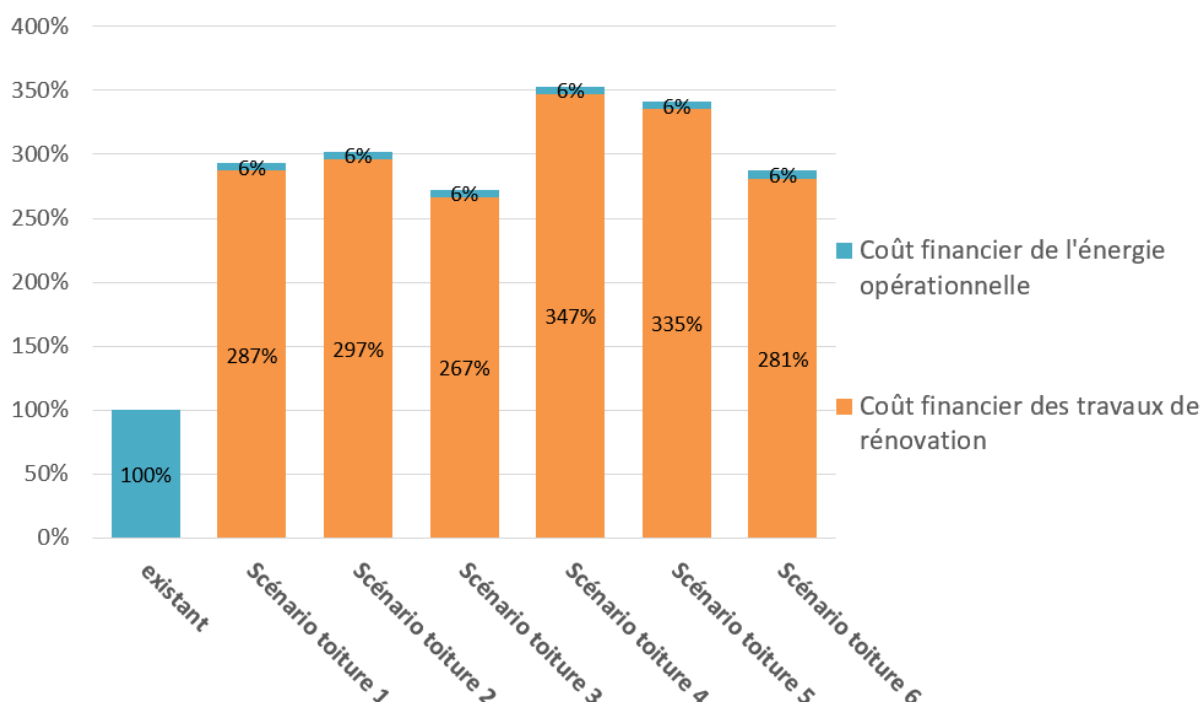


FIGURE 7.11 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

Du point de vue financier, cette durée de 20 ans n'arrange rien pour la rentabilité des scénarios. Ceux-ci sont encore plus déficitaires qu'avant et entraînent des pertes d'environ trois fois du coût de la situation

existante (figure 7.11).

L'analyse de sensibilité ne modifie pas les conclusions tirées précédemment pour la comparaison entre le coût environnemental et le coût financier.

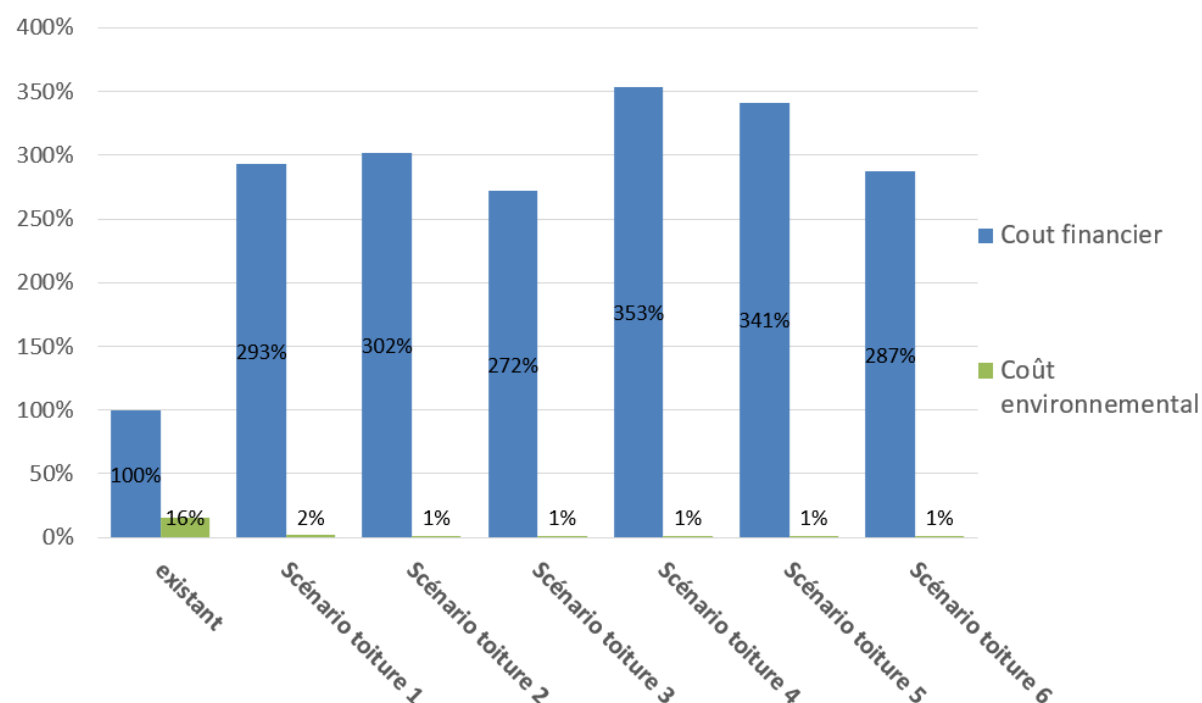


FIGURE 7.12 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

La durée de vie est maintenant de 60 ans. Cette hypothèse est réaliste, même si on considère généralement une durée de vie des bâtiments de 100 ans. En effet, rénover et entretenir un bâtiment a tendance à prolonger sa durée de vie.

Sur 60 ans, les économies sont un peu meilleures que pour la durée de vie à 40 ans. Elles approchent des 90% pour la plupart des scénarios (7.13).

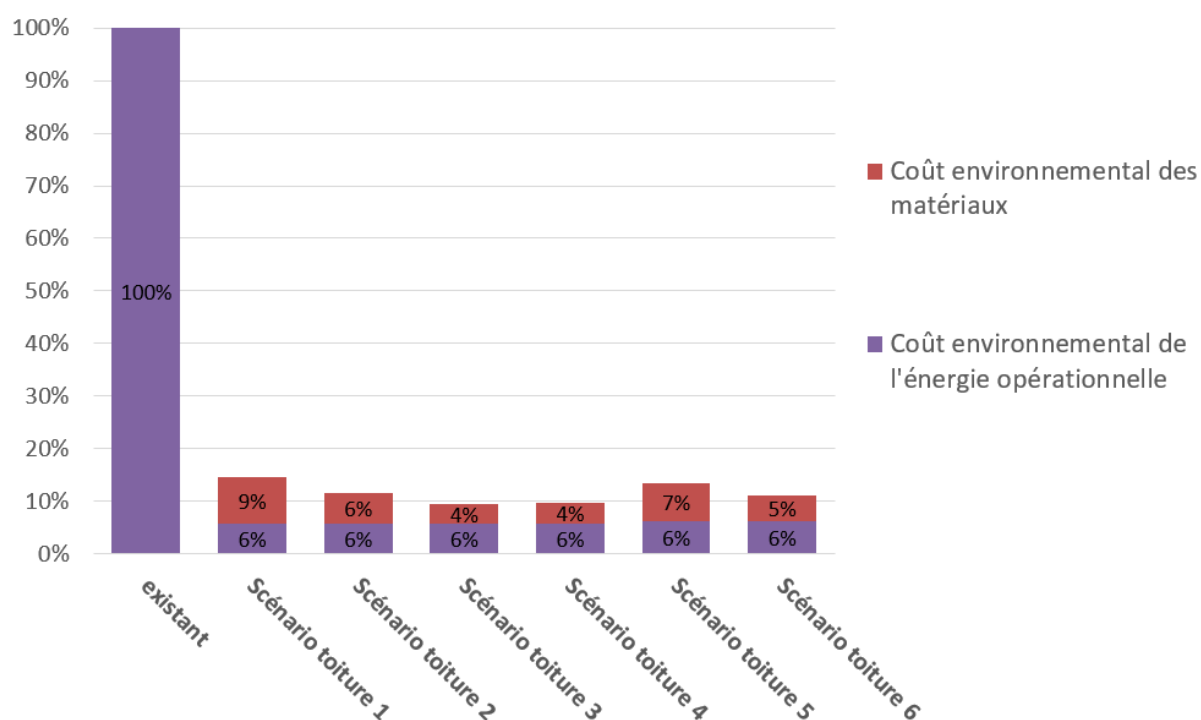


FIGURE 7.13 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

Sur la durée de vie de 60 ans, tous les scénarios deviennent rentables, alors qu'aucun d'entre eux ne l'était précédemment, comme constaté sur la figure 7.14. Cela est probablement dû à l'évolution des prix de l'énergie dans le temps qui rend la rénovation de plus en plus intéressante au fil des années.

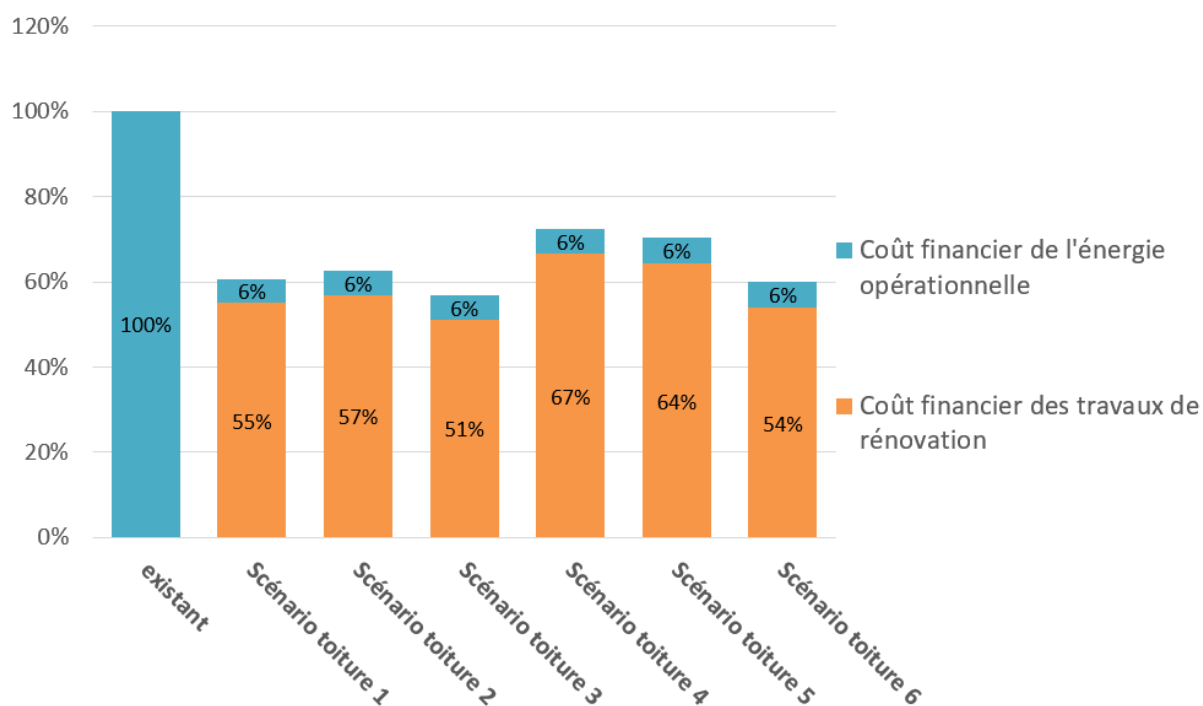


FIGURE 7.14 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

Pour la même raison, on peut voir sur la figure 7.15 que le coût environnemental diminue par rapport au coût financier. Non pas parce que l'impact environnemental baisse, mais uniquement car le coût financier augmente à cause de l'évolution des prix de l'énergie.

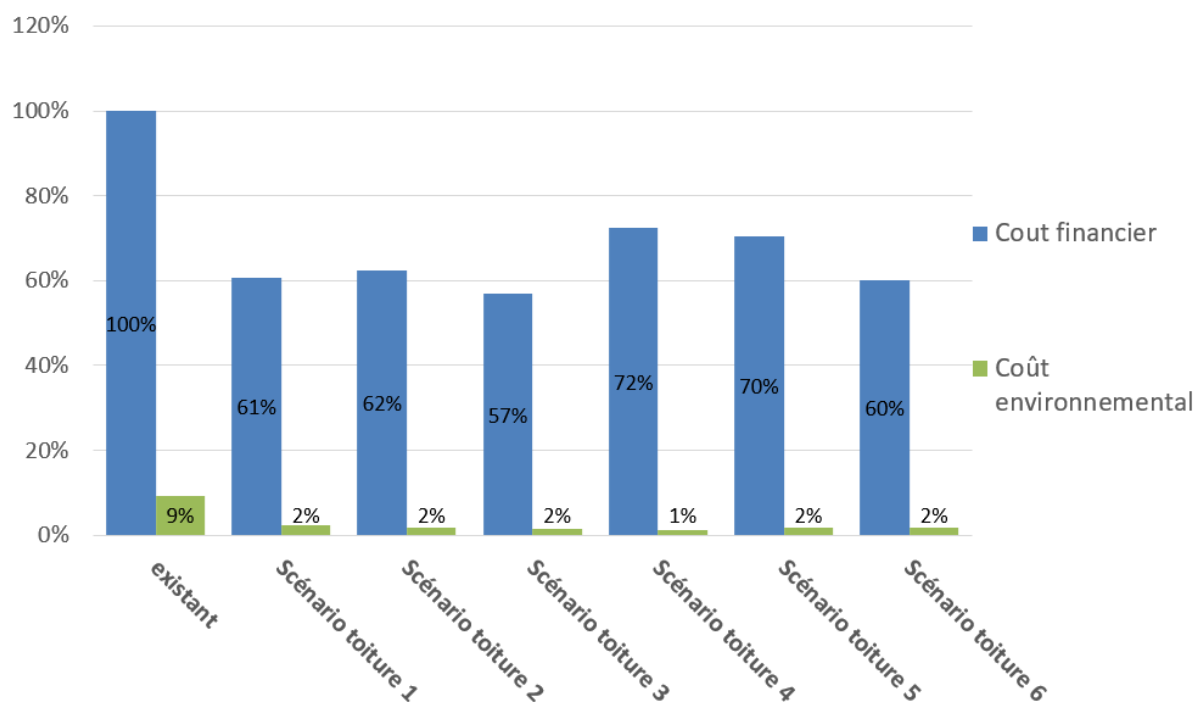


FIGURE 7.15 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

8

Résultats - Remplacement des fenêtres

Dans cette section, nous détaillons les résultats de l'analyse du cycle de vie et du coût cycle de vie obtenus pour les scénarios de remplacements des fenêtres existantes. La durée de vie est fixée à 40 ans et fait l'objet d'une analyse de sensibilité en fin de section.

8.1 Résultats des scénarios de rénovation

8.1.1 Résultats de l'analyse du cycle de vie

Nous comparons tout d'abord sur la figure 8.1 la part de l'impact environnemental associé à l'énergie opérationnelle et à l'impact des matériaux. La part moyenne de l'énergie grise varie cette fois entre 30 et 35% pour chaque scénario. Ce pourcentage est plus faible que pour les autres postes de rénovation, murs et toiture. Nous sommes plus proches de ce que l'on peut retrouver habituellement dans un bâtiment énergétiquement peu performant. Cela se justifie car les fenêtres sont les parois les plus déperditives et ce malgré les avancées pour produire des châssis et des vitrages avec la valeur U la plus faible.

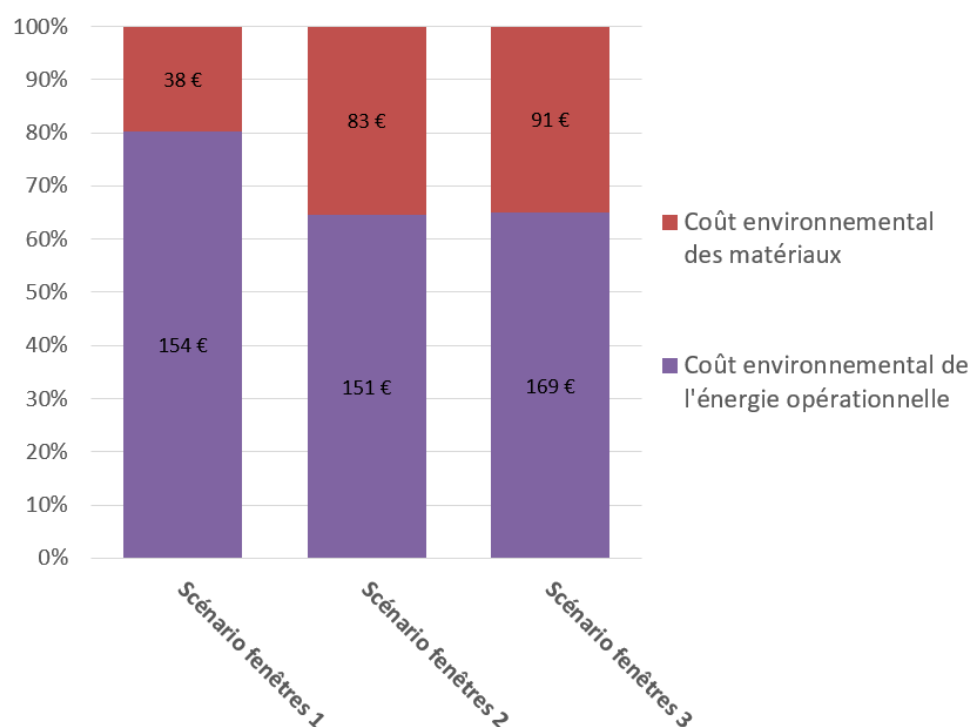


FIGURE 8.1 – Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de remplacement des fenêtres.

Le coût environnemental total pour les matériaux est illustré sur la figure 8.2 selon les indicateurs d'impact. Le coût total varie entre 40 et 90 € environ. En comparaison, le coût pour les murs était de 200 à 500€, et celui de la toiture entre 100 et 275 €. L'impact environnemental des fenêtres est donc considérable compte tenu de leur surface très réduite par rapport à la surface des murs ou de la toiture. Le scénario 3 avec le châssis en PVC engendre le coût environnemental le plus élevé, suivi de près par le scénario 2 avec les châssis en aluminium. Le scénario 1 avec les châssis en bois est deux fois moins impactant. Le réchauffement climatique est encore la catégorie la plus représentée. L'eutrophisation est proportionnellement importante pour le scénario 3.

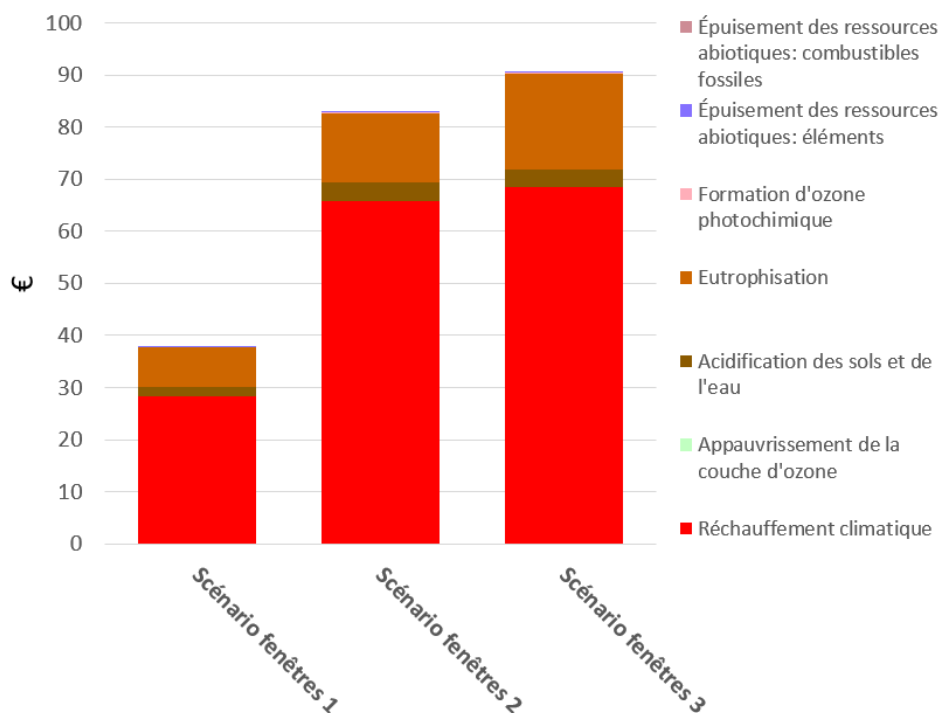


FIGURE 8.2 – Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénario de remplacement des fenêtres.

Concernant le coût environnemental par phases du cycle de vie exposé sur la figure 8.3, c'est bien la phase B6 pour l'énergie opérationnelle qui a le plus d'impact. La raison est la même qu'expliquée précédemment, les fenêtres sont des parois avec plus de déperditions que les autres. Le coût environnemental de la production est plus élevé pour la fenêtre au châssis en aluminium et double vitrage. Tous les scénarios considèrent une durée de vie de 30 ans pour le vitrage, qui doit donc être remplacé une fois sur le cycle de vie. Les châssis aluminium ont une très bonne durabilité et ne doivent pas être remplacés. Ceux en bois ont une durée de vie de 40 ans environ, à condition d'être régulièrement entretenus. Les châssis en PVC par contre, deviennent fragiles et cassants avec les années car ils vieillissent mal face aux UV. Leur durée de vie de 30 ans implique donc un remplacement qui alourdit le bilan de ce scénario. La fin de vie du PVC est aussi plus élevée que pour les autres solutions.

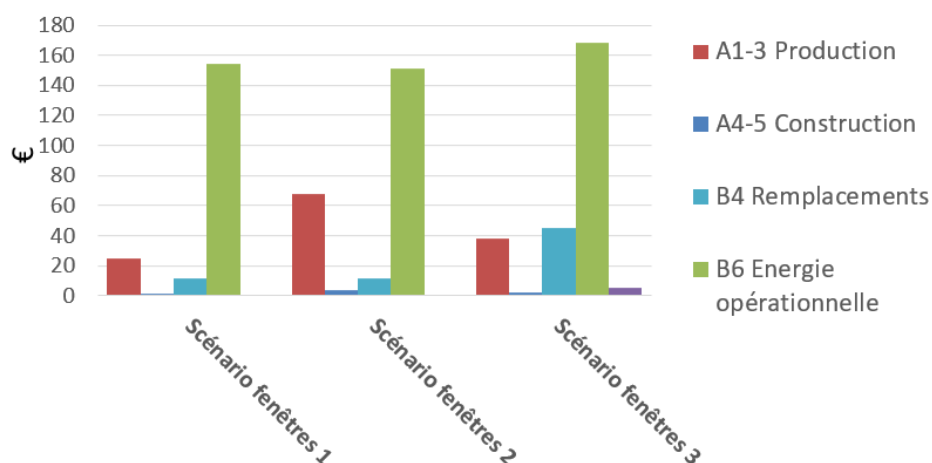


FIGURE 8.3 – Coût environnemental par phases du cycle de vie pour les scénarios de remplacement des fenêtres.

La figure 8.4 illustre le coût environnemental des matériaux par m² mis en oeuvre. Les remplacements des châssis et vitrages ne sont pas considérés ici. On constate que la part du vitrage est bien plus faible que celle des châssis. Et ce malgré la surface plus importante du vitrage et la phase de production du verre qui consomme beaucoup d'énergie pour la fonte. Le triple vitrage de la solution 3 engendre environ le double d'impact par rapport à un double vitrage classique. Le châssis en aluminium est 3 fois plus impactant que celui en bois et 2 fois plus que celui en PVC. Cela s'explique car l'industrie de l'aluminium engendre de graves et multiples conséquences sur l'environnement. Elle constitue presque un cumul de ce qu'il se fait de pire en matière de production de matériaux : déforestation pour creuser des mines à ciel ouvert, rejet de boues rouges toxiques lors de l'extraction à partir du minerai de bauxite et processus de transformation très énergivore en électricité.

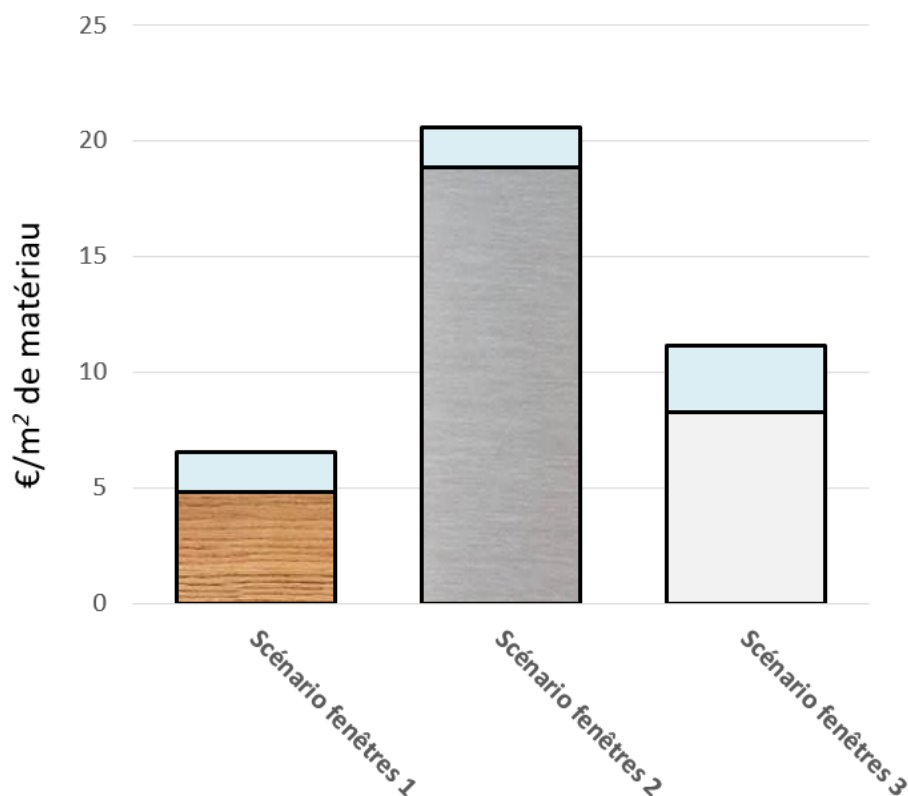


FIGURE 8.4 – Coût environnemental des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de remplacement des fenêtres.

Scénario fenêtres 1 - Châssis en bois tropical non-traité + Double vitrage

Scénario fenêtres 2 - Châssis en aluminium + Double vitrage

Scénario fenêtres 3 - Châssis en PVC + Triple vitrage

8.1.2 Résultats du coût du cycle de vie

Le coût du cycle de vie pour la situation existante et pour la rénovation est calculé en considérant une durée de vie de 40 ans. Tous les coûts sont exprimés en valeur actuelle nette VAN avec un taux d'actualisation nominal de 0.74%, une croissance des prix annuelle de l'énergie de 3.18% et une croissance des prix de la construction de 2.27%.

Sur la figure 8.5, on peut voir que le coût total sur le cycle de vie est négatif pour le scénario 1 et 2 car les économies financière sur l'énergie compense l'investissement réalisé pour remplacer les châssis. Sauf pour le scénario 3 car les châssis en PVC doivent être remplacés après 30 ans.

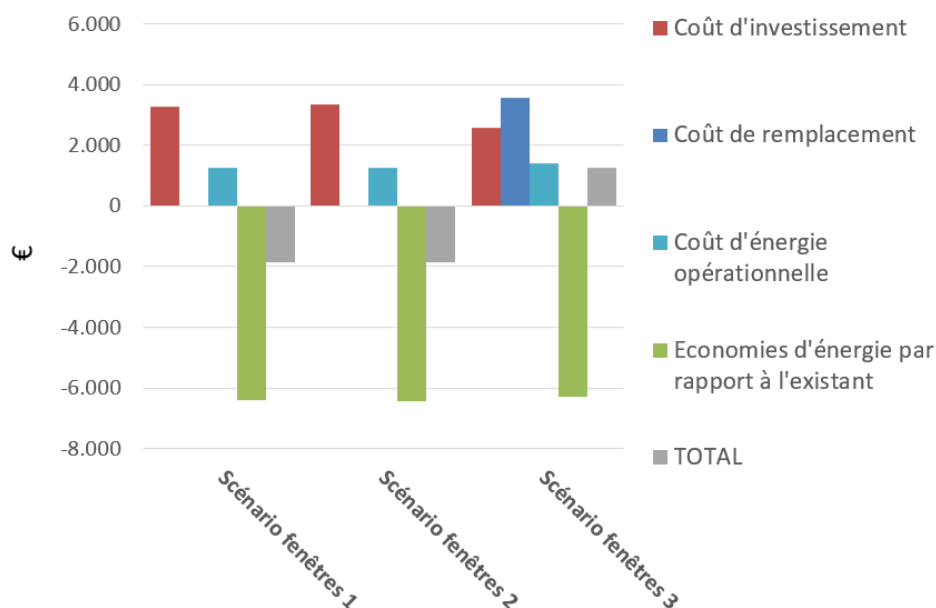


FIGURE 8.5 – Coût financier par phases du cycle de vie pour les scénarios de remplacement des fenêtres.

La figure 8.6 montre que le scénario 3 avec les châssis en PVC est le scénario le plus économique. Les scénarios 1 et 2 ont un coût quasi similaire. Il faut compter généralement un surplus de 20% pour l'acquisition d'un châssis en bois par rapport à un châssis en PVC.

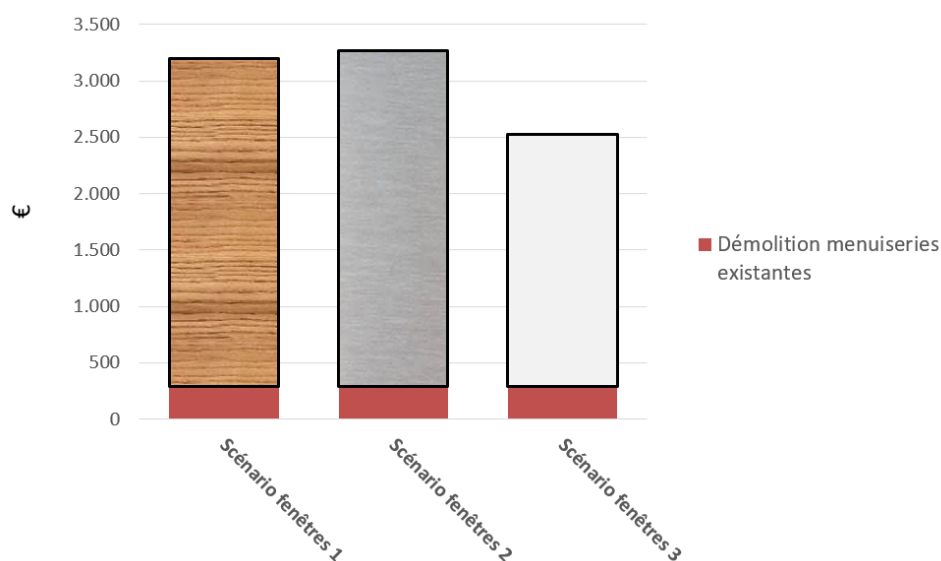


FIGURE 8.6 – Coût financier des matériaux mis en oeuvre dans chaque scénario de remplacement des fenêtres.

Scénario fenêtres 1 - Châssis en bois tropical non-traité + Double vitrage

Scénario fenêtres 2 - Châssis en aluminium + Double vitrage

Scénario fenêtres 3 - Châssis en PVC + Triple vitrage

8.2 Comparaison avec la situation existante

Nous poursuivons cette analyse avec la comparaison entre les scénarios de rénovation et la situation existante. Pour le coût environnemental tout d'abord sur la figure 8.7. Les économies environnementales sont toujours importantes, environ -70 à -80% par rapport à l'existant. L'ordre de grandeur des économies est un peu moins important que pour les murs ou la toiture. Le coût environnemental de l'énergie opérationnelle est prépondérant sur le coût environnemental des matériaux.

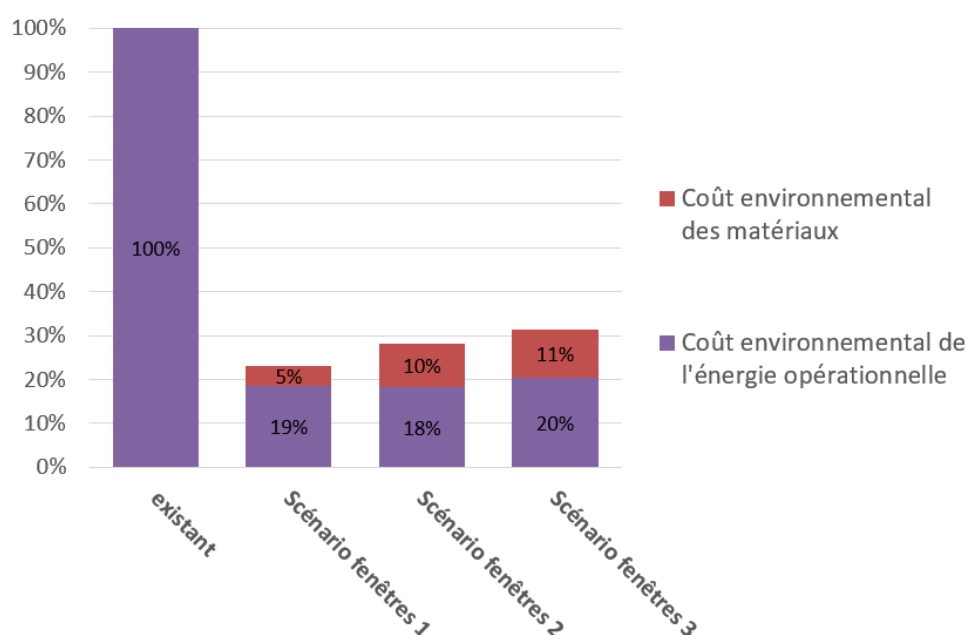


FIGURE 8.7 – Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de remplacement des fenêtres.

Le tableau 8.1 illustre le temps de retour sur investissement environnemental. Comme pour les deux autres postes de rénovation, le retour sur investissement est très rapide et varie autour de 2 à 3 ans.

Temps de retour sur investissement environnemental (années)		
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
1.6	4.2	2.7

TABLE 8.1 – Temps de retour sur investissement environnemental pour les scénarios de remplacement des fenêtres.

Le coût financier présenté sur la figure 8.8 n'inclut pas les coûts de remplacements et de fin de vie. Les châssis en PVC s'avèrent donc la solution la plus économique. Tous les scénarios sont rentables sur la période considérée de 40 ans. Il est important de remarquer ici que la part du coût total consacrée à

l'énergie opérationnelle est bien plus importante que pour les murs ou la toiture, ce qui relativise le coût de l'investissement pour le remplacement des châssis.

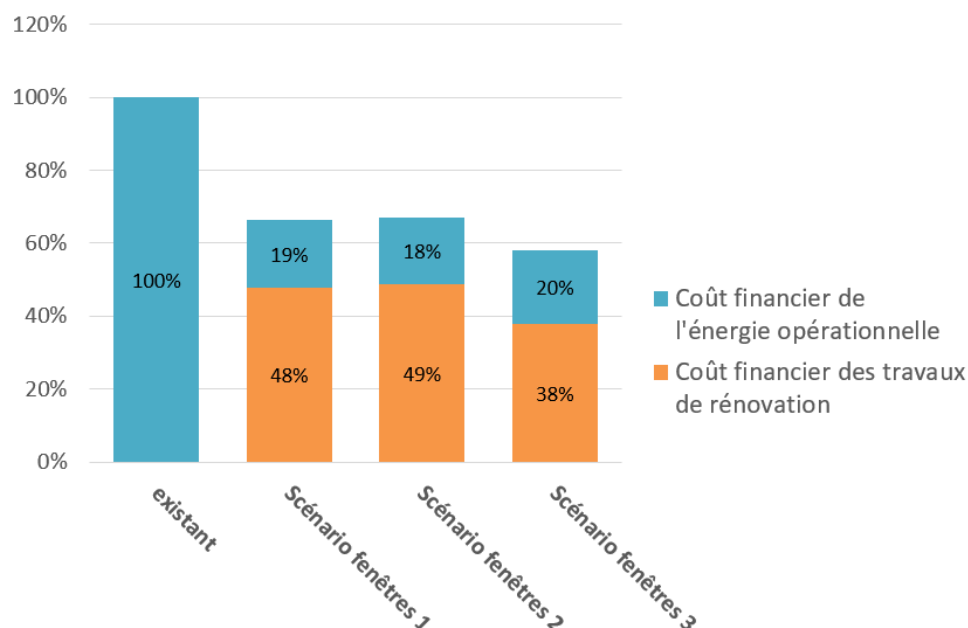


FIGURE 8.8 – Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les remplacement des fenêtres.

En comparaison avec les deux autres postes de rénovations, le temps de retour sur investissement financier est bien plus raisonnable avec une moyenne de 26 ans comme constaté sur le tableau 8.2. Remplacer les châssis est donc un investissement intéressant sur 40 ans. Les fenêtres sont des points faibles thermiques dans l'enveloppe du bâtiment. Corriger ces points faibles ne nécessite pas un investissement très important car la surface à traiter est peu importante. Et cela engendre des économies importantes. Voilà pourquoi cette solution de rénovation est plus rentable.

Temps de retour sur investissement financier (années)		
Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
27	28	23

TABLE 8.2 – Temps de retour sur investissement financier pour les scénarios de remplacement des fenêtres.

Sur la figure 8.9, on remarque que le coût environnemental est toujours très faible comparé au coût financier. Mais cette différence est moins marquée que pour les murs et la toiture car le coût environnemental des scénarios est plus important. En effet, même si ceux-ci améliorent les performances thermiques des fenêtres, celles-ci conservent le statut de point faible dans l'enveloppe. Elles restent les surfaces les plus déperditives, entraînant le plus de coût proportionnellement à leur surface.

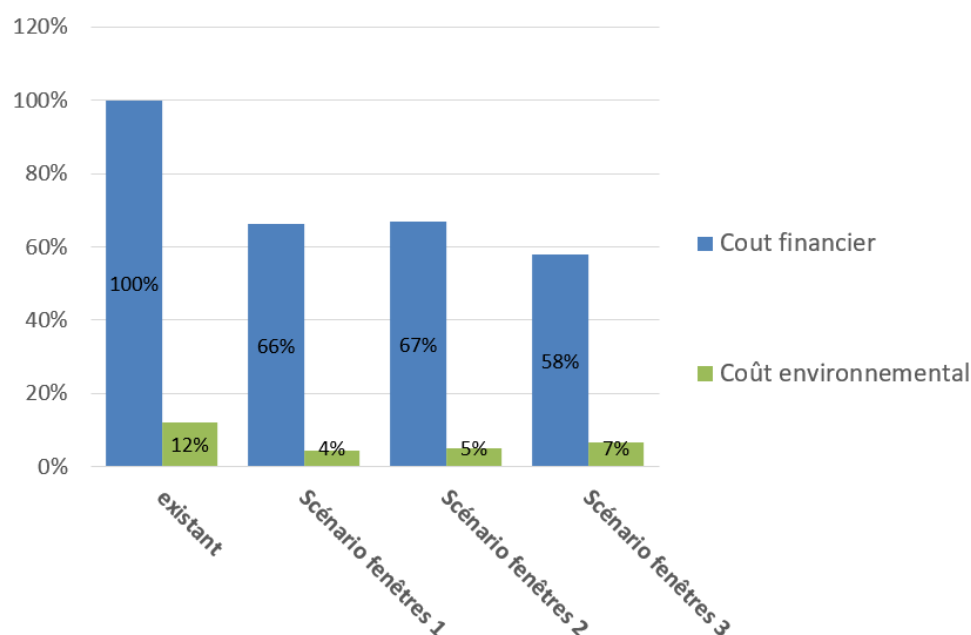


FIGURE 8.9 – Coût financier et coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de remplacement des fenêtres.

8.3 Analyse de sensibilité sur la durée de vie

La durée de vie est maintenant fixée à 20 ans pour étudier la variabilité des résultats. Remplacer les châssis reste pertinent du point de vue environnemental (figure 8.10). Les économies environnementales sont un peu plus faibles. L'impact des matériaux est plus important proportionnellement. Le châssis en aluminium devient la solution la moins intéressante au niveau environnemental car le châssis en PVC n'a pas besoin d'être remplacé en 20 ans, alors que la longue durée de vie du châssis aluminium n'est pas mise à profit.

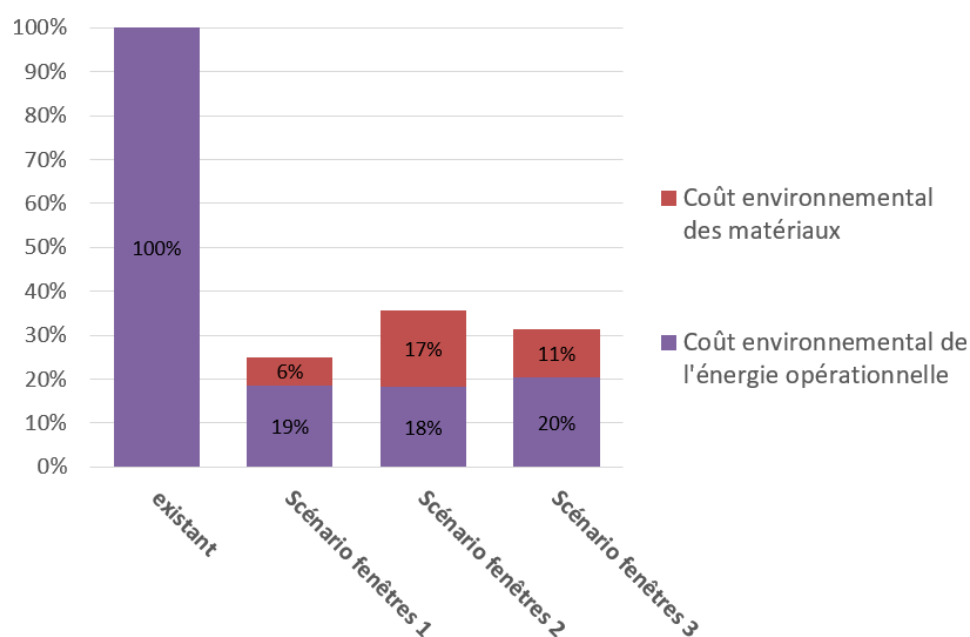


FIGURE 8.10 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

Du point de vue financier, plus aucune solution de rénovation n'est idéale puisque le temps de retour sur investissement est supérieur à la durée de vie de 20 ans (figure 8.11). Les pertes sont plus modérées que pour la rénovation des murs : de 20 à 50%.

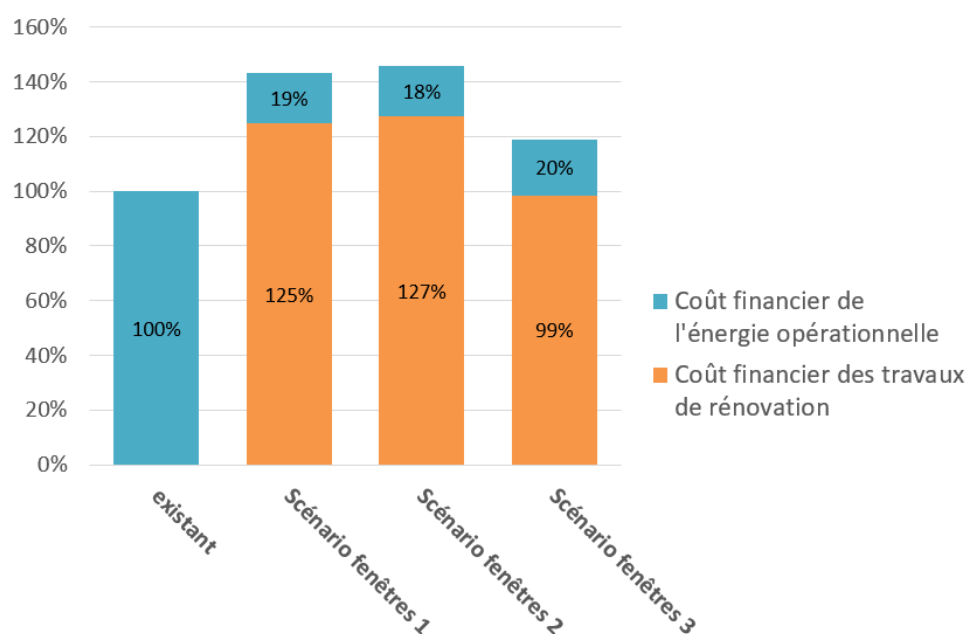


FIGURE 8.11 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

L'analyse de sensibilité ne modifie pas les conclusions tirées précédemment pour la comparaison entre le coût environnemental et le coût financier (figure 8.12).

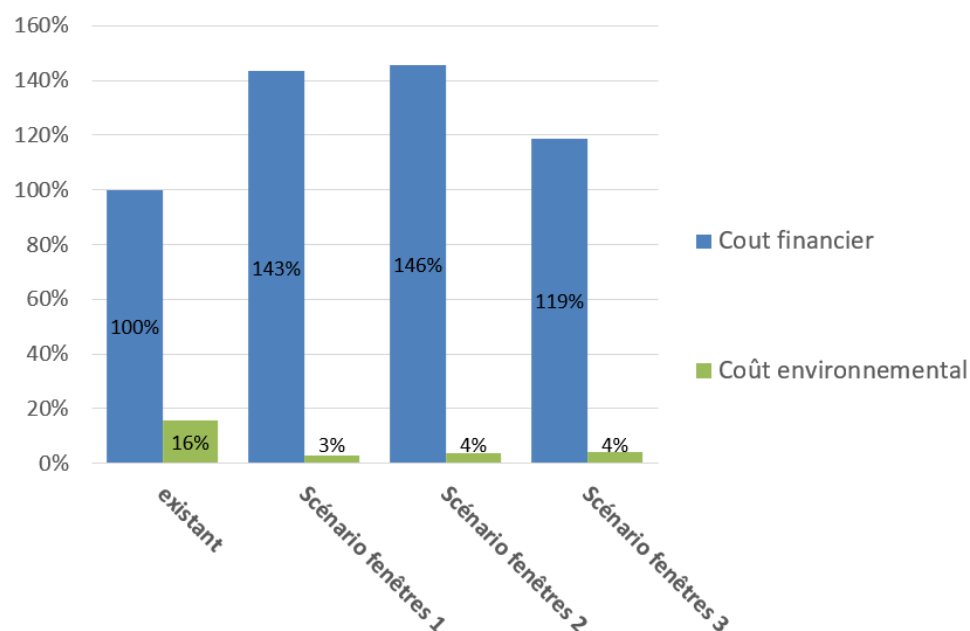


FIGURE 8.12 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 20 ans.

La durée de vie est maintenant de 60 ans. Cette hypothèse est réaliste, même si on considère généralement une durée de vie des bâtiments de 100 ans. En effet, rénover et entretenir un bâtiment à tendance à prolonger sa durée de vie.

Sur 60 ans, les économies sont un peu plus importantes que pour la durée de vie à 40 ans. Elles approchent des 75% pour la plupart des scénarios (figure 8.13). la part de l'impact attribué à l'énergie opérationnelle est majoritaire par rapport au coût environnemental des matériaux.

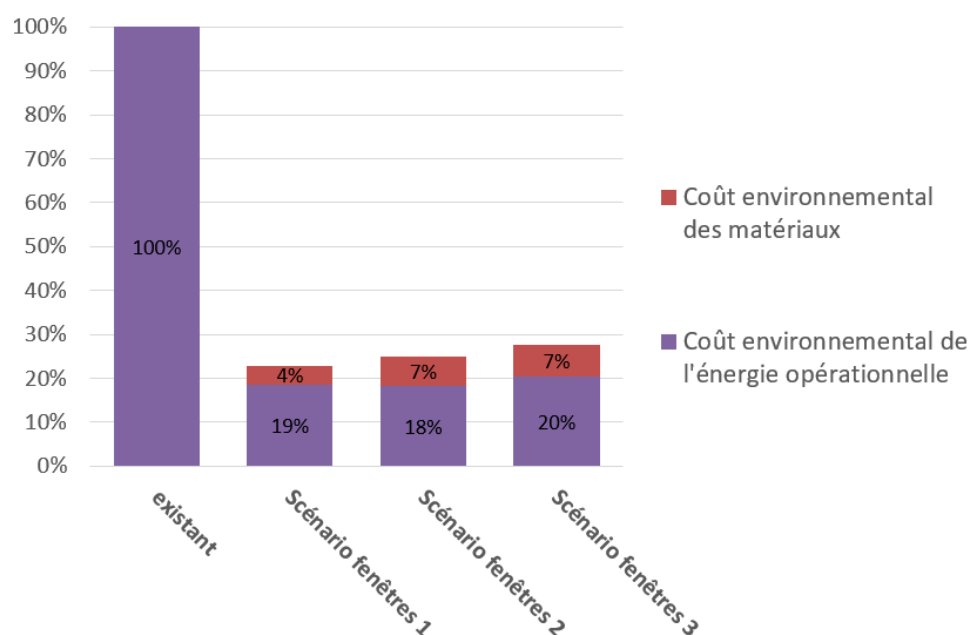


FIGURE 8.13 – Coût environnemental des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

Sur la durée de vie de 60 ans, les scénarios améliorent leur rentabilité. Comme observé sur la figure 8.14, ils permettent de réaliser des économies financières de l'ordre de 60% environ en comparaison avec la situation existante. Le coût financier de l'énergie devient équivalent à celui des travaux de rénovation.

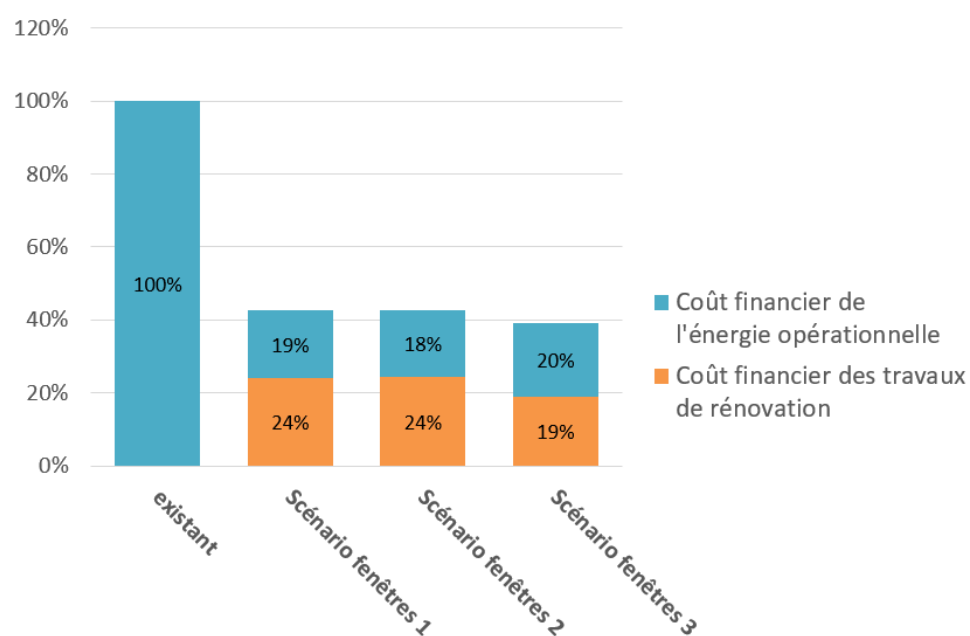


FIGURE 8.14 – Coût financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

A nouveau, on peut voir sur la figure 8.15 que le coût environnemental diminue par rapport au coût financier. Parce que le coût financier augmente suite à l'évolution des prix de l'énergie.

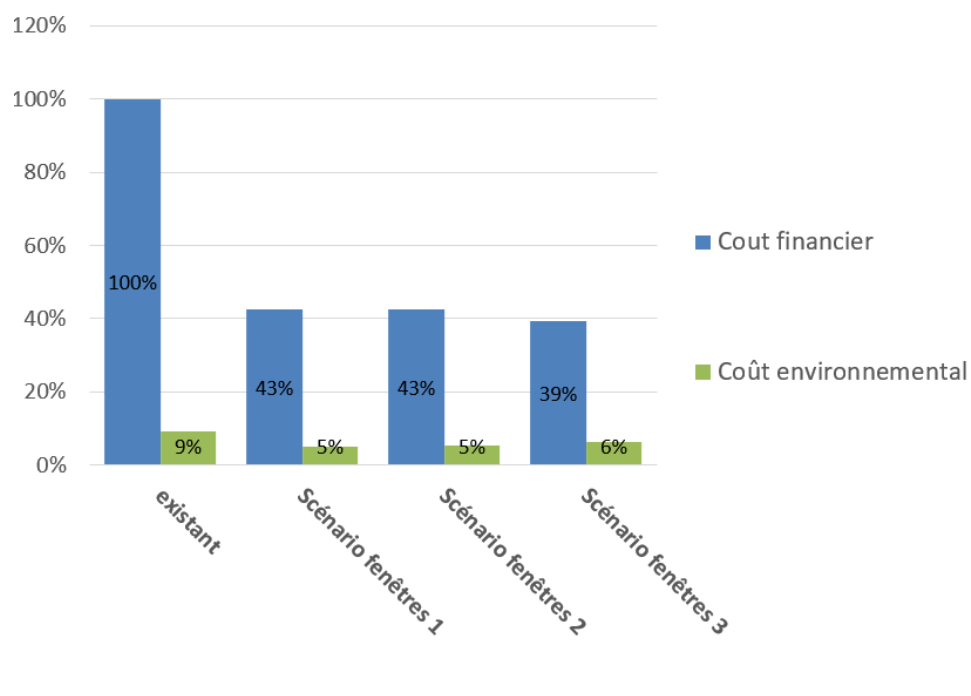


FIGURE 8.15 – Coût environnemental et financier des scénarios par rapport à la situation existante pour une durée de vie de 60 ans.

9

Analyse comparative au niveau du bâtiment

9.1 Sélection des scénarios de bâtiment

Dans un premier temps, nous avons réalisé l'analyse du cycle de vie et le coût du cycle de vie pour les trois types de paroi à rénover : murs extérieurs, toiture et fenêtres. Les résultats pour ces trois catégories sont présentés et commentés dans la section précédente. Il est maintenant temps de sélectionner les solutions de paroi les plus pertinentes, aussi bien du point de vue environnemental que financier, de façon à élaborer des scénarios de rénovation globale à l'échelle du bâtiment. Si cela s'avère nécessaire, nous modifions les compositions de paroi vues précédemment en remplaçant certains matériaux par d'autres, pour améliorer le coût environnemental ou financier de la solution. Nous réalisons ici trois scénarios de bâtiment différents, sur base des trois questions de recherches de départ :

- Le scénario de rénovation possédant le coût environnemental le plus faible.
- Le scénario de rénovation possédant le coût financier le plus faible.
- Le scénario de rénovation possédant à la fois le coût environnemental et le coût financier le plus faible possible.

Le matériau d'isolation qui sort du lot au niveau financier pour la rénovation des murs est la laine de verre en vrac à insuffler KNAUF Supafil. La laine de verre, sous quelque forme que ce soit, est un matériau peu onéreux comme nous l'avons vu dans le chapitre 5.3.4. Les isolants en vrac sont généralement moins chers que les mêmes isolants sous forme de panneaux comme visible sur la figure 6.6 à la page 93. Une fois la coulisse ventilée remplie d'isolant, il est possible de revêtir la façade de panneaux en polystyrène expansé en 12cm. Ce sont les panneaux rigides isolants les moins chers du marché.

Pour l'aspect environnemental, le matériau le plus intéressant serait l'ouate de cellulose ISOCELL, insufflée dans des caissons en ossature bois placés contre la façade. Mais comme nous l'avons vu sur la figure 6.4 à la page 91, la pose du revêtement extérieur en bardage bois alourdit le bilan environnemental et représente les 2/3 de l'impact total. Il est envisageable de remplacer ce bardage par un enduit, comme pour les solutions utilisant des panneaux isolants en façade. Celui-ci possède un meilleur coût environnemental. La pose d'un enduit sur une ossature bois fermée par un panneau nécessite généralement de

placer une couche d'accrochage supplémentaire par rapport aux panneaux rainurés prêt à enduire. Cette solution reste cependant plus chère comparativement aux autres propositions de rénovation.

Pour les solutions de rénovation de la toiture cette fois, l'enjeu environnemental et financier se rejoignent. L'insufflation d'ouate de cellulose ISOCELL est à la fois la solution la plus écologique, et également la meilleure marché. Cela s'explique par la mise en place sur chantier grâce à l'insufflation, qui est plus simple et rapide, et donc moins coûteuse, que le découpage et la pose d'isolants semi-rigides en matelas un par un entre les chevrons.

Enfin, pour le remplacement des fenêtres, l'investissement de départ le plus rentable à court terme serait d'installer des châssis en PVC équipés de triple vitrage. Néanmoins, la durée de vie de 30 ans de ceux-ci est plus faible que pour les châssis en bois (40 ans) ou en aluminium (60 ans). Par conséquent, dans une vision de long terme, on préférera les châssis en aluminium ou en bois à condition qu'ils soit bien entretenus.

Du point de vue environnemental maintenant, le choix semble évident comme on peut le voir sur la figure 8.4 à la page 119. Ce sont les châssis en bois équipés de double vitrage qui se démarquent. Surtout si l'on considère que les châssis en PVC, la seconde meilleure solution, doivent être remplacés plus rapidement que ceux-ci.

En définitive, le tableau 9.1 résume les choix de matériaux composant chaque paroi pour les trois scénarios de rénovation à l'échelle du bâtiment.

Scénarios de rénovation à l'échelle du bâtiment				
		Murs extérieurs	Toiture	Fenêtres
1	Coût financier le plus faible	Laine de verre KNAUF Supafil + Panneau EPS	Cellulose ISOCELL	Châssis en PVC et triple vitrage
2	Coût environnemental le plus faible	Ossature bois remplie de cellulose ISOCELL	Cellulose ISOCELL	Châssis en bois et double vitrage
3	Coût environnemental et financier le plus faible	Laine de verre KNAUF Supafil + Panneau EPS	Cellulose ISOCELL	Châssis en bois et double vitrage

TABLE 9.1 – Composition des parois pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

9.2 Comparaison des scénarios de bâtiment

Les résultats de l'analyse du cycle de vie et du coût cycle de vie obtenus pour les scénarios de rénovation à l'échelle du bâtiment sont d'abord exposés de façon globale, puis détaillés par type de paroi. La

durée de vie est fixée à 40 ans.

La figure 9.1 montre que la part de l'impact environnemental associée à l'impact des matériaux, l'énergie "grise", varie entre 30 et 45% pour le bâtiment au complet. Pourtant, nous obtenions pour les scénarios de murs une énergie grise de 30 à 50% et pour la toiture 40 à 70%. Ce chiffre de 30-45% semble faible en comparaison. En fait, c'est en lien direct avec le choix des parois pour les scénarios de bâtiment : la toiture avec la cellulose insufflée, les châssis bois, la laine de verre et le polystyrène expansé. Dans les résultats précédents, ces parois avaient toutes une énergie grise plus faible que leurs concurrentes. Les résultats des scénarios 2 et 3 sont très similaires. Le scénario 1 par contre possède une énergie grise proportionnellement plus élevée.

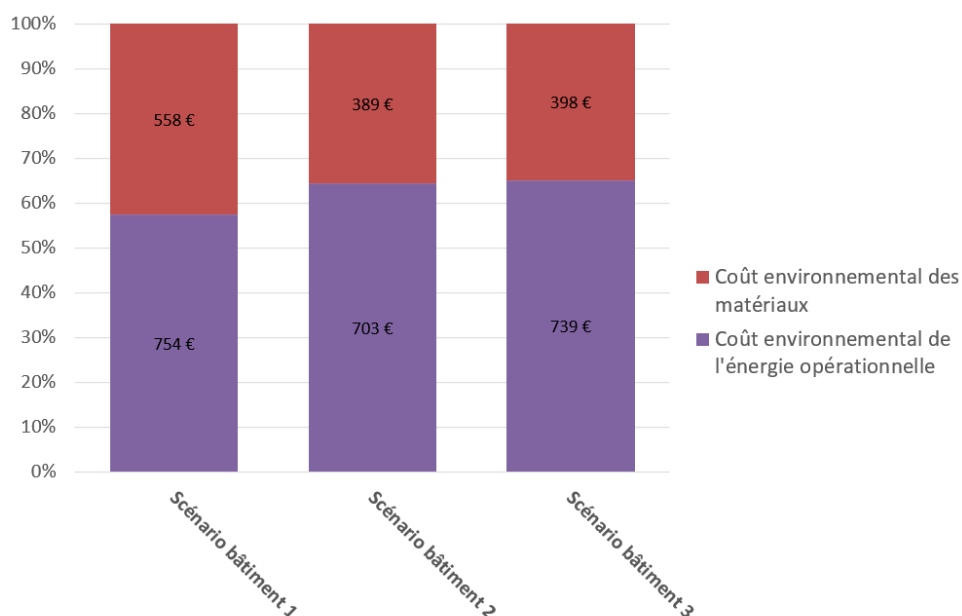


FIGURE 9.1 – Coût environnemental - Impact de l'énergie opérationnelle et des matériaux pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

La figure 9.2 montre le coût environnemental total pour les matériaux uniquement. Le coût des matériaux varie entre 400 et 550 €. Le scénario avec le coût environnemental le plus élevé est bien évidemment le scénario 1. Mais il est intéressant de constater que les scénarios 2 et 3 sont quasiment égaux en terme d'impact. L'indicateur le plus représenté est le réchauffement climatique. L'eutrophisation est conséquente pour le scénario 1 et représente près de la moitié de l'impact.

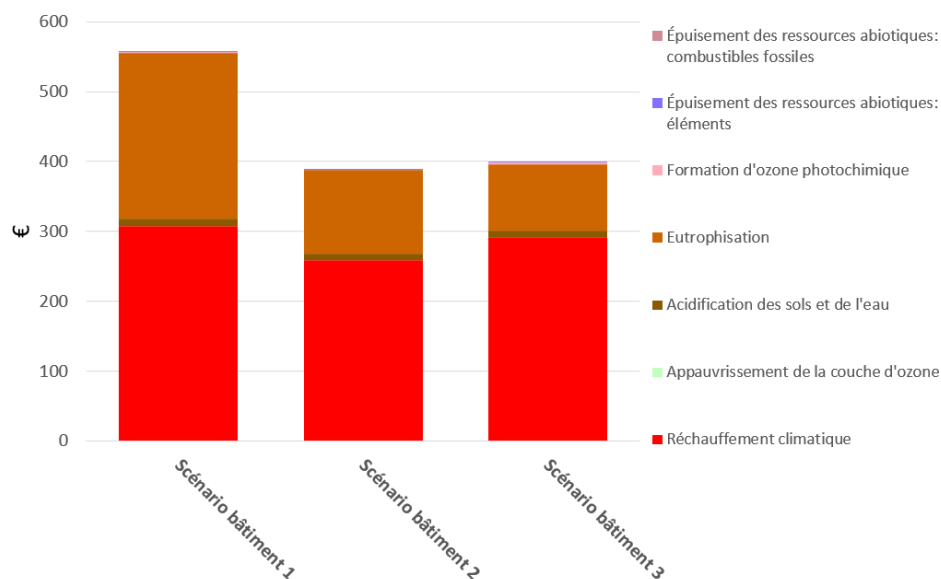


FIGURE 9.2 – Coût environnemental des matériaux par indicateur d'impact pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

Nous observons maintenant les figures 9.3 et 9.4. Les murs sont le poste de rénovation avec le coût environnemental et le coût financier le plus élevé. Certainement car ils représentent la surface la plus importante à traiter du bâtiment. Les fenêtres ont le coût financier le plus faible, mais leur coût environnemental est supérieur à celui de la toiture. Probablement car leur valeur U est plus élevée et qu'elles constituent donc un point faible dans l'enveloppe.

Sur la figure 9.3, on remarque que le choix de solution de rénovation des murs n'entraîne pas de variation importante de coût. L'ossature bois insufflée de cellulose a un impact similaire à l'insufflation de laine de verre dans la coulisse, complétée d'un panneau de polystyrène. Par contre en terme de coût, la figure 9.4 montre que les murs du scénario 2 sont environ plus chers de 10 000 €. La performance environnementale étant égale, on préférera donc l'insufflation de laine de verre et le polystyrène pour les murs.

A l'inverse, le choix de fenêtres entraîne des modifications importantes. L'impact des fenêtres du scénario 1 est presque deux fois plus important que pour le scénario 2 et 3 (figure 9.3). Les châssis PVC sont bien plus impactants que les châssis bois. La figure 9.4 met en évidence que la différence de coût entre ces deux solutions n'est pas très importante, 500 € sur le cycle de vie de 40 ans. De plus, cette différence de coût est marginale vis à vis du coût global du projet de rénovation qui s'élève entre 55000 et 65000 €

Mettre en parallèle les résultats de coût environnementaux et de coût financier permet de dégager la solution la plus intéressante sur ces deux tableaux. Par rapport au scénario 1 qui possède le meilleur bilan financier, le scénario 3, pour 1% d'investissement financier supplémentaire (500 €), permet de réaliser 13% d'économies environnementales en plus (200 €). Cette configuration pourrait être qualifiée

d'idéale, tant du point de vue environnemental que financier.

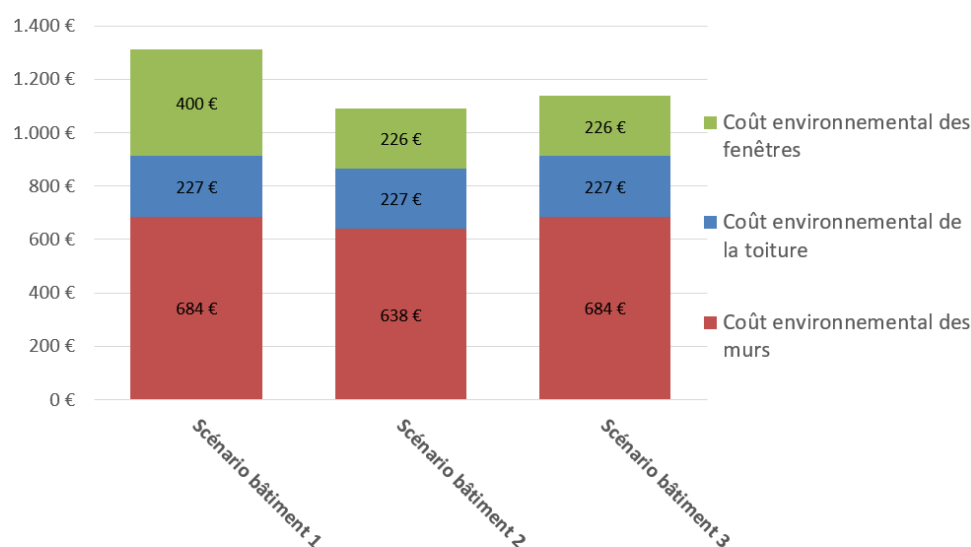


FIGURE 9.3 – Coût environnemental par type de paroi pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

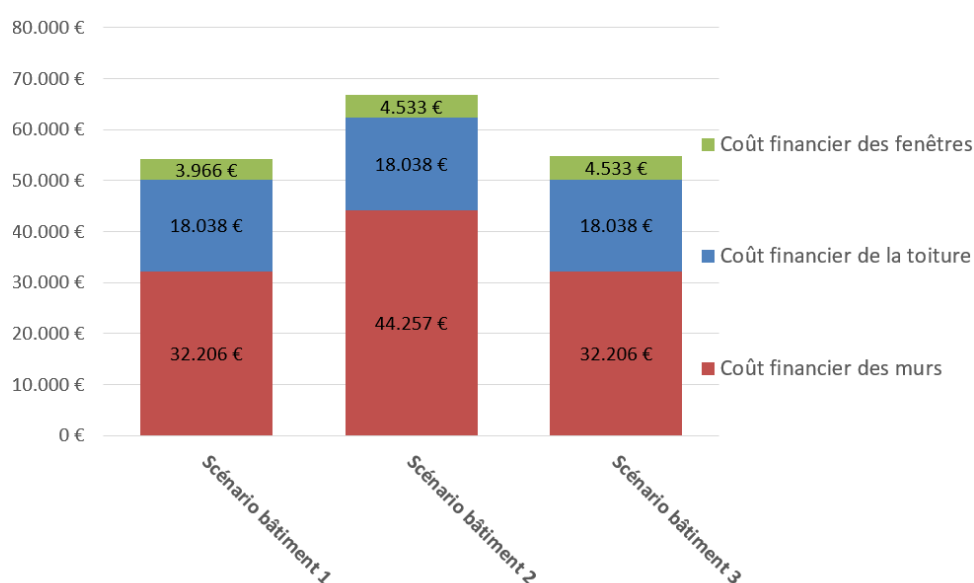


FIGURE 9.4 – Coût financier par type de paroi pour les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

Nous poursuivons cette analyse avec la comparaison entre les scénarios de rénovation et la situation existante grâce à la figure 9.5. A nouveau, les scénarios de rénovation sont tous très efficaces en terme d'économies environnementales par rapport à l'existant. Elles varient entre 83 et 86% sur la période considérée de 40 ans. Les scénarios 2 et 3 sont quasiment identiques en terme d'impact environnemental, la différence n'est que de 1%. Le scénario 1 est un rien plus impactant. En comparaison avec l'existant, les variations entre les scénarios sont infimes.

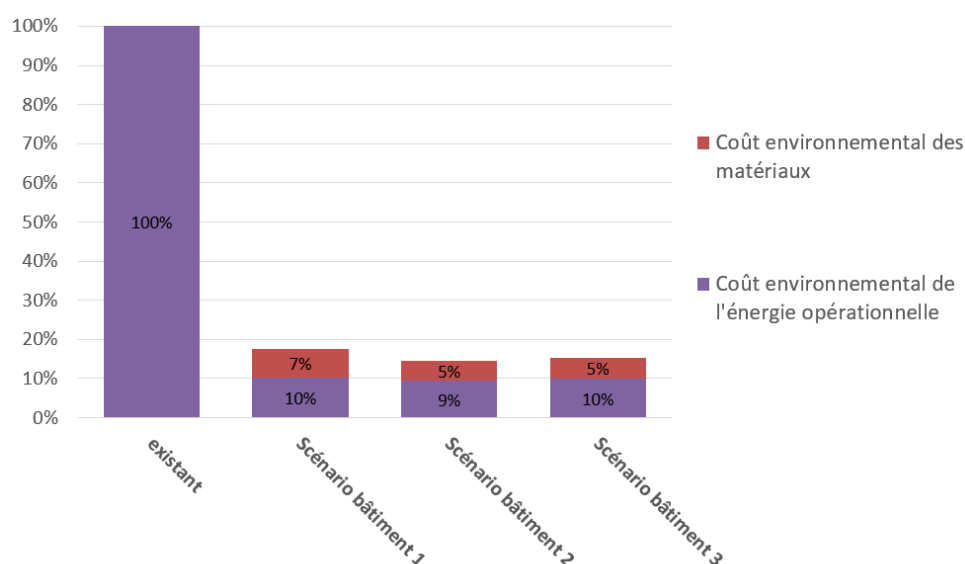


FIGURE 9.5 – Coût environnemental - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

Les scénarios 1 et 3 sont rentables comme on peut le voir sur la figure 9.6. Ils permettent de réaliser des économies financières de respectivement 12 et 11%. Ce qui correspond à une somme d'importance moyenne d'environ 7000 € sur 40 ans. Par contre le scénario 2 ne l'est pas et engendre une perte financière de 5000 €.

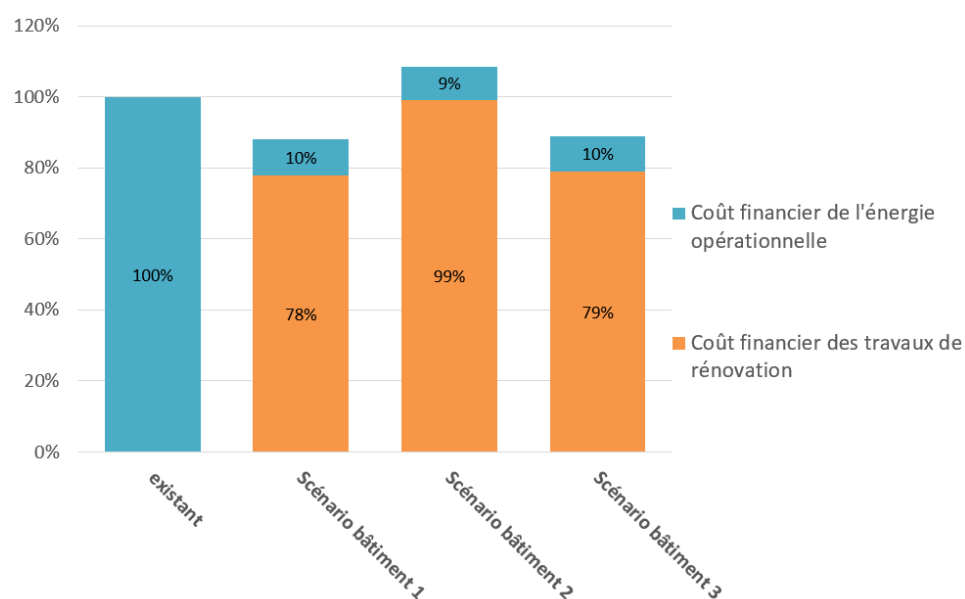


FIGURE 9.6 – Coût financier - Comparaison entre la situation existante et les scénarios de rénovation au niveau du bâtiment.

A nouveau, lorsque l'on met en parallèle les résultats de coût environnementaux et de coût financier, c'est bien le scénario 3 qui sort du lot. Pour un investissement 1% plus important que le scénario 1, le

scénario 3 réalise une économie environnemental 2% plus importante que celui-ci. Alors que le scénario 2 nécessite 19% d'investissement en plus pour réaliser une économie environnemental de 3%.

En définitive, le scénario 3 permet de répondre à la troisième et dernière question de recherche : "Quels sont les matériaux et techniques de rénovation à l'impact le plus réduit possible pour le coût le plus réduit possible ?". Une configuration qu'on pourrait qualifiée d'idéale du point de vue environnemental et économique est atteinte avec : une post-isolation des murs creux avec des fibres de laine de verre et un panneau de polystyrène enduit en façade, une insufflation d'ouate de cellulose en toiture et l'installation de châssis bois double vitrage.

Coût environnemental en euros/mètre carré de SPB			
Existant	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
55	10	8	8

TABLE 9.2 – Coût environnemental des scénarios de rénovation à l'échelle du bâtiment exprimé en € par m² de surface de plancher brute.

10

Discussion

Les résultats obtenus suite à l'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie m'ont assez surpris. Ils ont remis en cause mes intuitions premières quant à l'impact des matériaux utilisés pour la rénovation.

Lorsque j'ai débuté ce travail et choisi le sujet, j'étais persuadé que les matériaux auraient un impact important sur le bilan environnemental total de la rénovation. Comme vu précédemment, c'est bien le cas lorsque l'on compare la part de l'énergie opérationnelle (énergie grise) avec celle des matériaux utilisés dans la rénovation. Une fois rénové, les matériaux utilisés dans les parois peuvent représenter de 30 à 60% de l'impact environnemental de ces dernières. Au niveau des scénarios de bâtiment, ces chiffres avoisinent 30-45%. La littérature existante confirme ces résultats. Par exemple, Vilches et al. (2016) ont réalisé une revue de littérature sur l'analyse du cycle de vie dans la rénovation et obtiennent des valeurs similaires. C'est supérieur à ce que l'on peut retrouver pour un bâtiment peu performant du point de vue énergétique où ce rapport est plutôt de 10% pour l'énergie grise et 90% pour l'énergie blanche.

Avant cette étude, je n'avais pas envisagé que le bilan environnemental total de la rénovation serait à ce point dérisoire face à l'impact environnemental de la situation existante. Tous les scénarios de rénovation étudiés réalisent des économies environnementales très importantes, de l'ordre de 70 à 85% environ. Le temps de retour environnemental varie de 2 à 6 ans. Il est extrêmement rapide, peu importe les scénarios. Ce temps de retour est en adéquation avec les études déjà réalisés dans le domaine (Vilches 2016). L'impact environnemental de l'énergie économisée grâce à la rénovation est tel qu'il relativise fortement l'importance du choix des matériaux. Contrairement à mon intuition de départ, il en ressort que le bilan environnemental de ces derniers est très faible face aux économies environnementales réalisées. Ce n'est donc pas un critère déterminant. J'en conclus que le plus important est de rénover coûte que coûte, afin de faire baisser l'impact de l'énergie opérationnelle. Même si cela nécessite d'utiliser des matériaux peu intéressants du point de vue de l'analyse du cycle de vie.

Rénover en utilisant des matériaux écologiques peut ainsi être vu comme une sorte de "bonus" pour réduire de quelques pourcents de plus l'impact de la rénovation comparativement à la situation existante. Cela à son intérêt et doit pouvoir être étudié pour développer des solutions de rénovation durables à grande échelle mais cela sera toujours un enjeu secondaire.

Le critère déterminant est véritablement le prix. Il conditionne la rénovation même puisqu'elle se réalise toujours à l'initiative et à charge financière des propriétaires. Malgré l'importance des économies financières réalisées sur la facture d'énergie, l'investissement de départ pour les travaux est tellement coûteux que l'opération devient difficilement rentable, ou est même déficitaire, sur la période considérée de 40 ans. Certains postes de rénovation sont plus rentables que d'autres comme le remplacement des fenêtres. Le temps de retour sur investissement est extrêmement long, il varie entre 20 et 60 ans environ. Cela peut décourager considérablement les propriétaires. Ils préféreront payer leur facture d'énergie plus chère tous les mois plutôt que d'investir une somme quasiment égale en une fois à l'année 0.

Il est intéressant de constater à quel point le temps de retour sur investissement financier diffère du temps de retour sur investissement environnemental. Si d'un point de vue environnemental, il est toujours intéressant de rénover, même pour quelques années, pour le côté financier ça n'est clairement pas le cas. Ce constat rejoint celui fait par d'autres études qui montrent que les enjeux environnementaux et économiques ne correspondent pas encore. L'augmentation du coût de l'énergie dans l'avenir pourrait modifier ce paramètre et rendre plus intéressante la rénovation du point de vue financier.

Il est donc très important de mettre en avant la rénovation énergétique, même avec des matériaux peu intéressants du point de vue de l'analyse du cycle de vie.

Néanmoins, il est possible d'élaborer des scénarios de rénovation accessibles financièrement tout en réduisant l'impact environnemental des matériaux.

Les isolants en vrac par exemple sont intéressants à plusieurs égards. Ils sont à la fois moins coûteux que leurs homologues sous formes de panneaux et engendrent généralement un impact environnemental plus faible. Cela est dû au peu de transformation nécessaire à leur production et à leur mise en œuvre simple. La technique de l'insufflation est un procédé rapide et économique car la main d'œuvre est restreinte. Cette technique semble promise à un bel avenir en Belgique puisque le stock bâti existant est composé essentiellement de bâtiments construits selon la technique du double mur avec une coulisse ventilée. Du point de vue de la rénovation, disposer d'un espace vide entre deux murs pouvant recevoir un isolant en vrac sans autres travaux supplémentaires est presque une aubaine. D'autant plus, que ce sont les premiers centimètres d'isolant qui ont le plus d'effet sur les performances thermiques. Cette méthode pourrait être appliquée de façon systématique pour améliorer le stock bâti à moindre coût. Cependant, l'épaisseur de la coulisse est limitée et varie entre 3 et 10 cm. Par conséquent, elle ne permettra jamais d'atteindre une valeur U de mur conforme à la PEB. De plus, cette méthode n'est pas toujours possible car la coulisse peut être obstruée en pied de mur par des déchets de mortiers qui deviendront des ponts thermiques dans l'enveloppe une fois rénovée.

Cette étude met en évidence que l'ouate de cellulose est une technique d'isolation à l'impact environnemental faible, tout en ayant un prix très compétitif. Le faible impact sur l'environnement s'explique par l'origine de la matière première, à savoir des déchets de papier recyclé. L'étape de transformation est minimale : les déchets de papier étant juste broyés et mélangés aux sels minéraux. Le sel de bore et le

sulfate d'ammonium ont toutefois des effets toxiques pour la santé et l'environnement. La fin de vie est donc plus complexe à gérer, mais au vu de ses autres qualités et de sa longue durée de vie, son usage est donc justifié. Du point de vue économique, la cellulose est abordable car sa mise en œuvre est simple et rapide grâce à l'insufflation. C'est l'isolant bio-sourcé le moins cher du marché. De plus, elle est très polyvalente et peut être utilisée pour la toiture comme pour les murs. La technique d'insufflation permet d'injecter de l'isolant même dans les recoins les plus difficiles d'accès.

Contrairement aux idées reçues, il est important de retenir que tous les matériaux d'origine naturelle ne sont pas forcément synonymes de matériaux écologiques. Le liège, par exemple, est importé du Portugal. Sa forme expansée est obtenue grâce à une cuisson dans un four à autoclave et engendre d'importantes émissions de CO₂. Il présente au final un bilan environnemental mitigé. De toute façon, la production de liège est trop faible que pour être utilisée à large échelle. De plus, son prix prohibitif décourage son utilisation. L'utilisation de ce matériau noble et plutôt esthétique pour l'isolation me semble dommage. La dépense financière et environnementale pour le positionnement en façade et le recouvrement par un enduit m'apparaît regrettable. Le liège me semble bien plus légitime comme finition de sol à l'intérieur.

Si l'on souhaite mener des rénovations à large échelle, il reste préférable d'utiliser des matériaux écologiques. Voilà pourquoi il est important de soutenir les entreprises installées sur notre territoire fabriquant ce genre de matériaux. Afin qu'elles puissent se développer, dépasser un certain volume de commandes et gagner de nouvelles parts de marché face aux géants du secteur des matériaux de construction. Cela permettra de réduire les prix et de rendre ces matériaux plus accessibles pour démocratiser la rénovation et la construction neuve à caractère écologique.

Le politique a un rôle essentiel et déterminant à jouer. Il dispose d'instruments tels que des taxes pour encourager le choix d'une solution écologique plutôt qu'une solution conventionnelle. Instaurer une taxe carbone sur les matériaux à l'impact environnemental élevé, couplée à des subventions pour l'utilisation de matériaux écologiques, pourrait être une solution. La taxe pourrait, par exemple, être fixée au montant du coût environnemental déterminé au moyen d'une analyse de cycle de vie monétisée selon la méthode MMG. Toutefois il faudrait veiller à limiter la répercussion sur le prix pour le client car cela pourrait avoir des conséquences inverses en augmentant trop le coût de la rénovation. Et comme nous l'avons vu, le plus important est de rénover, peu importe la technique.

Il existe déjà des primes en Belgique pour l'amélioration thermique des bâtiments. Ces primes sont majorées de 25% si les matériaux possèdent le label « produit bio-sourcé ». Pour en bénéficier, les matériaux utilisés doivent être issus de la biomasse à 70

Dans les scénarios étudiés, c'est le type d'isolation qui a systématiquement varié plutôt que les autres composants de la paroi. L'idée était que l'isolation, vu son volume important, serait le matériau le plus critique et déterminerait à lui seul l'impact environnemental de la paroi. Les résultats montrent que cela n'est pas nécessairement le cas. Le revêtement extérieur est responsable d'une grande partie de l'impact général. De plus, certains matériaux insoupçonnés, tel que l'OSB, alourdissent le bilan environnemental.

La mise en œuvre d'une isolation extérieure nécessite de refaire la finition extérieure. Selon le type d'isolant, il sera plus cohérent de réaliser un enduit (plus économique) ou un bardage (plus onéreux). Cette dernière finition augmente généralement le prix et le bilan environnemental.

Une autre surprise fut les résultats environnementaux obtenus pour les matériaux issus de la base de données de TOTEM. Comme nous l'avons vu, celle-ci utilise les données génériques d'Ecoinvent pour réaliser l'analyse du cycle de vie au niveau du bâtiment. Or certains résultats me semblent presque absurdes. Par exemple, les résultats montrent que la laine de chanvre est deux fois plus impactante que la laine de verre ou la laine de roche. Le chanvre est pourtant un matériau d'origine bio-sourcé, réputé pour son excellent bilan environnemental et très utilisé dans le domaine de la construction écologique. Sa transformation en panneau est certes polluante, mais pas plus que celle de la laine de verre ou la laine de roche. Cela semble dû aux hypothèses de la méthode MMG utilisée dans TOTEM.

Les données de TOTEM ne tiennent pas compte de la séquestration de carbone par les végétaux pendant leur croissance, appelé aussi "carbone biogénique". La prise en compte de ce paramètre dans l'analyse du cycle de vie est régie par la norme NF EN 16760. Dans TOTEM, l'hypothèse est faite que le CO₂ capté durant la croissance des plantes sera intégralement réémis en fin de vie et que donc le bilan total sur le cycle de vie est nul. Cette hypothèse "carbon neutral" me semble problématique pour deux raisons.

En premier lieu, elle ne permet pas de prendre en compte le fait que tout le carbone biogénique capté en phase de production n'est pas forcément réémis dans l'atmosphère. En pratique, le scénario de fin de vie considéré a énormément d'influence. Si le matériau finit sa vie dans un incinérateur, alors le CO₂ sera probablement intégralement restitué. Mais s'il finit en décharge, ou mieux, dans un compost, le carbone biogénique retournera pour partie au sol sous forme de matière organique riche en carbone. Le bilan total sur le cycle de vie sera donc négatif et pas nul. De plus, même si le bilan total sur le cycle de vie est considéré comme nul, la séquestration de gaz carbonique hors de l'atmosphère durant la durée de vie du matériau, qui peut être de 50 ans, 60 ans, ou plus, a de l'importance. Churkina et al. (2019) ont montré que stocker du CO₂ dans les matériaux de construction « puits de carbone » est intéressante pour endiguer le changement climatique.

J'aurais souhaité prendre en compte cette séquestration de CO₂ dans mes calculs afin d'étudier ses effets. Mais, afin d'avoir une base de données cohérente, je me suis aligné sur la méthode de TOTEM. J'ai converti les fiches EPD récoltées auprès des entreprises pour retirer ce carbone biogénique. Je trouve dommage que TOTEM n'en tienne pas compte. Selon moi, l'hypothèse « carbon neutral » est une approche artificielle, hors sol, qui pénalise fortement les matériaux écologiques d'origine bio-sourcé.

Par ailleurs, j'ai remarqué que les matériaux génériques de TOTEM sont généralement plus impactant que leurs homologues réels rencontrés sur le terrain. Les fiches EPD récoltées auprès des entreprises lors de ce travail mentionnent des données pour l'indicateur de réchauffement climatique variant du simple au double avec celle issues de TOTEM pour le même matériau. De plus, les entreprises annoncent souvent

une valeur lambda bien inférieure à celle encodée dans TOTEM. La comparaison entre matériaux réels et matériaux génériques est donc d'autant plus délicate. Pour y remédier, il est prévu, à l'horizon 2020, que TOTEM adapte sa base de données en intégrant les fiches EPD des entreprises de matériaux.

Dans ce travail, j'ai choisi de réaliser une analyse du cycle de vie ayant recours à l'étape facultative de pondération au moyen d'une monétisation, permettant de traduire l'impact environnemental de chaque indicateur en un score globalisé facilitant les comparaisons entre matériaux pour aider à la prise de décision. J'ai pour cela utilisé les facteurs de monétisation inclus dans TOTEM, qui sont eux-mêmes issus de la méthodologie MMG.

Après utilisation, j'aimerais émettre quelques doutes sur la pertinence de cette méthode. Tout d'abord, la notion de coût environnemental, bien que très intéressante pour rendre compte des externalités négatives, est difficilement comparable avec les coûts réels. Les premiers sont supportés par la société dans son ensemble. Les grandes entreprises peuvent dégrader l'environnement sans que personne ne finance une éventuelle dépollution. Les seconds sont des coûts réels qui pèsent directement sur le particulier. Il doit s'acquitter directement de la somme nécessaire aux travaux de rénovation et de ses factures d'énergie tous les mois.

La pondération a tendance à relativiser le poids des indicateurs. Le réchauffement climatique est systématiquement l'indicateur le plus représenté, il écrase tous les autres. Viennent ensuite, et dans cet ordre : l'eutrophisation et l'acidification. Si l'on choisissait d'autres valeurs pour les facteurs de monétisation, les résultats seraient bien différents. Ces facteurs ont une influence importante sur les résultats et leur présentation. La pondération peut occulter des informations, ou pire les manipuler pour mettre en avant certains résultats. Il est donc logique que son usage soit régi par la norme ISO 14040. De plus, même si les facteurs de monétisation sont issus d'études scientifiques reconnues, je trouve qu'il est périlleux d'attribuer une valeur financière à un impact environnemental. La vision de l'ingénieur a tendance à appréhender le monde qui l'entoure de façon quantitative. Or, évaluer l'impact de nos activités sur l'environnement ne peut se résumer à une sorte de comptabilité environnementale. Il existe quelque chose de fondamentalement qualitatif qui ne peut être exprimé sous forme de chiffres.

Cette étude aborde la rénovation du point de vue de l'analyse du cycle de vie et du coût du cycle de vie. L'approche est donc centrée uniquement sur l'aspect environnemental et financier. Nous n'avons jamais tenu compte des facteurs sociologiques, du confort, de la santé, etc. Or, il s'agit de paramètres importants pour comprendre la motivation des particuliers ou des collectivités investissant de l'argent dans la rénovation de leur bien immobilier. Ainsi, certaines personnes feront remplacer leurs châssis, non pas pour des raisons économiques ou environnementales, mais tout simplement pour améliorer le confort acoustique car ils habitent à proximité d'une source de nuisances sonores.

Le confort a son importance au niveau des matériaux également. Si la conductivité thermique d'un matériau est généralement exprimée au moyen de la valeur lambda, d'autres critères entrent aussi en jeu. Le déphasage thermique par exemple traduit la capacité des matériaux à ralentir les transferts de chaleur,

et améliore ainsi le confort l'été lors des fortes chaleurs. A titre de comparaison, en 20cm, la cellulose d'ISOCELL possède un déphasage de 9,5h, le GRAMMITHERM un déphasage de 11h et les laines minérales un déphasage de 3 à 4h seulement. La capacité des matériaux à réguler l'humidité intérieure est aussi un paramètre important afin de garantir le confort au sein de l'habitation. Les matériaux d'origine bio-sourcés sont réputés dans ce domaine.

Enfin, pour terminer, j'aimerais rappeler que nous avons fait beaucoup d'hypothèses dans cette étude : hypothèses sur le cas d'étude, hypothèses sur les données des matériaux, hypothèses sur la durée de vie, etc. Les résultats présentés dans cette étude doivent être pris avec précaution. Il importe de se focaliser sur les ordres de grandeur plutôt que sur des chiffres exacts

Le secteur de la construction est responsable d'une partie importante de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ au niveau mondial. L'Europe s'est engagée dans une voie de réduction de ses émissions dans ce domaine. La Wallonie lui emboîte le pas au travers de son plan Energie-Climat et se fixe des objectifs ambitieux à l'horizon 2050. Dans le monde du bâtiment, les considérations environnementales prennent une place de plus en plus importante au fur et à mesure des années. En tant qu'ingénieur-architecte, il est primordial de s'inscrire dans cette démarche afin de poursuivre cette transition vers un modèle de société résolument plus durable en apportant des solutions au défi du changement climatique.

La rénovation des logements existants est une excellente opportunité de participer à relever ce défi. En effet, c'est à ce niveau que le potentiel d'économie d'énergie est le plus important. En Belgique, le stock bâti est âgé et peu performant. Nombre de bâtiments ne sont tout simplement pas isolés et constituent de réels gouffres énergétiques. Il est temps de rénover massivement les logements wallons. L'enjeu en est d'ailleurs multiple : environnemental, économique, social, sanitaire, etc. L'idée progresse et il est raisonnable d'espérer voir naître d'ici à la prochaine décennie des campagnes de rénovation de grande ampleur à l'échelon national ou européen. Encore faut-il les élaborer en amont, dès aujourd'hui, afin qu'elles soient réellement durables. C'est dans cette dynamique que s'inscrit ce travail.

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un procédé normalisé permettant l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit tout au long de son cycle de vie : depuis la production des matériaux jusqu'à la fin de vie. Cet outil est de plus en plus utilisé dans le monde de la construction car il permet de mettre en évidence l'impact lié à la consommation d'énergie opérationnelle et lié à l'énergie grise des matériaux. Dans les constructions neuves comme dans les logements après rénovation, cette part tant à devenir conséquente dans le bilan total. Si l'on souhaite poursuivre ces économies, il est impératif de chercher à minimiser l'impact des matériaux.

Le coût financier de la rénovation a lui aussi son importance. Car en définitive, c'est bien le propriétaire qui prend la décision de rénover. Malgré les économies réalisées sur la facture d'énergie, le coût des travaux est tel qu'il peut être une barrière à la rénovation. Voilà pourquoi il est pertinent d'étudier

le coût du cycle de vie conjointement à l'analyse du cycle de vie. Afin de mettre en parallèle l'aspect environnemental et économique. Dans ce travail, j'ai mis en oeuvre ces deux évaluations afin de dégager les méthodes de rénovation et les matériaux les plus intéressants du point de vue environnemental et financier.

Cette approche est inspirée de la méthodologie de l'outil belge TOTEM. Développé par les trois régions pour offrir une plate-forme simplifiant la réalisation d'une analyse du cycle de vie à l'échelle du bâtiment à destination des concepteurs et acteurs du monde de la construction. Le but est d'encourager le choix de matériaux avec un impact environnemental réduit. Les points clés de la méthodologie MMG sont implantés dans cette étude. Par exemple, la structure modulaire matériaux/parois/bâtiment permettant une analyse à différents niveaux. La monétisation permet d'exprimer l'impact environnemental sous la forme du coût des externalités. Les résultats sont agrégés sous la forme d'un score unique monétaire, et peuvent être comparés directement aux coûts réels.

Le cas d'étude de ce travail provient d'une recherche en cours réalisée par Attia S. et al. (2020) portant sur la caractérisation des performances énergétiques des typologies de logements en Belgique. L'archétype A est une maison quatre façades, unifamiliale, représentative du stock bâti belge de logements datant de la période 1945-1969. Ses performances énergétiques sont médiocres. Elles seraient potentiellement facilement améliorables car ce bâtiment n'a aucune valeur patrimoniale et peut être isolé par l'extérieur.

Afin d'élargir le spectre de cette étude, j'ai choisi d'aller à la rencontre des acteurs de terrain du monde de la construction. J'ai visité des entreprises produisant des matériaux isolants d'origine bio-sourcée afin de connaître leurs produits. Celles-ci ont mis à ma disposition leurs fiches EPD (Environmental Product Declaration). J'ai pu ainsi développer une base de données environnementales des matériaux. J'ai complété les informations manquantes grâce aux données de TOTEM. J'ai également pu bénéficier de l'expérience acquise par des entrepreneurs en construction effectuant régulièrement des travaux de rénovation. Leurs conseils pour le choix des matériaux composant les parois et les détails techniques furent précieux pour l'élaboration des scénarios de rénovation.

Dans ce travail, nous avons considéré une durée de vie restante pour le bâtiment de 40 ans car celui-ci est déjà âgé de 60 ans. Cette durée de vie a fait l'objet d'une analyse de sensibilité sur 20 et 60 ans. Au total, j'ai analysé six scénarios de rénovation pour les murs, six scénarios de rénovation de la toiture et trois scénarios pour le remplacement des fenêtres. Grâce au principe de modularité de TOTEM, les différentes parois ont pu être étudiées indépendamment les unes des autres. Après obtention des résultats et comparaison, les plus intéressantes d'entre elles du point de vue environnemental et financier ont été sélectionnées. Elles ont ensuite été assemblées de façon à constituer trois scénarios de rénovation de l'ensemble du bâtiment dans le but de répondre aux trois questions de recherche de départ :

- "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 ?"

Les résultats obtenus mettent en évidence que l'impact des matériaux sur le bilan environnemental après rénovation est conséquent. La part de cet impact comparativement à celle de l'énergie opérationnelle varie entre 30 à 45% pour les scénarios à l'échelle du bâtiment. Ce rapport est supérieur à ce que l'on peut retrouver pour un bâtiment peu performant du point de vue énergétique. Dans ce cas, on se situe plutôt autour de 10% pour l'énergie grise et de 90% pour l'énergie blanche. Par contre, les économies environnementales sont d'environ 80% par rapport à la situation existante, peu importe le scénario considéré. Dans tous les cas, le temps de retour environnemental est extrêmement rapide. Il n'est jamais supérieur à 6 ans. Ces résultats correspondent à ce qu'on peut retrouver dans la littérature.

L'impact environnemental de l'énergie économisée grâce à la rénovation est tel qu'il relativise fortement l'importance du choix des matériaux. Contrairement à mon intuition de départ, il en ressort que le bilan environnemental de ces derniers est dérisoire face aux économies réalisées. Ce n'est donc pas un critère déterminant. J'en conclus que le plus important est de rénover coûte que coûte, afin de faire baisser l'impact de l'énergie opérationnelle. Même si cela nécessite d'utiliser des matériaux peu intéressants du point de vue de l'analyse du cycle de vie.

Rénover en utilisant des matériaux écologiques peut ainsi être vu comme un « bonus » permettant de réduire de quelques pourcents supplémentaires l'impact de la rénovation comparativement à la situation existante. Cela a son intérêt et doit pouvoir être étudié pour développer des solutions de rénovation durables à grande échelle mais cela constituera toujours un enjeu secondaire.

En fin de compte, le point critique porte sur l'investissement nécessaire pour réaliser les travaux de rénovation. Malgré les économies réalisées sur la facture d'énergie, la rénovation n'est pas nécessairement une opération rentable et peut même entraîner une perte financière nette sur la durée de vie de 40 ans. Certains postes de rénovation sont plus rentables que d'autres comme le remplacement des fenêtres. Dans tous les cas, le temps de retour sur investissement financier est très long. Selon les postes de rénovation et les matériaux mis en oeuvre, il évolue entre 20 et 60 ans environ. C'est un obstacle majeur pour la rénovation, car les coûts sont supportés entièrement par les propriétaires. Et ce sont eux qui détiennent l'initiative en matière de rénovation.

Il est intéressant de constater à quel point le temps de retour sur investissement financier diffère du temps de retour sur investissement environnemental. Si d'un point de vue environnemental, il est toujours intéressant de rénover, même pour quelques années, du point de vue financier ce n'est clairement pas le cas. Ce constat rejoint celui fait par d'autres études qui montrent que les enjeux environnementaux et économiques ne correspondent pas encore.

Néanmoins, il est possible d'élaborer des scénarios de rénovation accessibles financièrement tout en réduisant l'impact environnemental des matériaux. Les résultats de ce travail montrent par exemple que

l'ouate de cellulose est un matériau d'isolation polyvalent qui possède un impact environnemental faible, tout en étant pour autant très compétitif. Cela s'explique par l'origine recyclée de la matière première, le peu de transformation nécessaire et l'insufflation sur chantier qui est un procédé rapide nécessitant peu de main d'oeuvre. De la même manière, les isolants en vrac servant à la post-isolation de la coulisse ventilée des murs creux semblent être une piste prometteuse pour la rénovation. Ils apportent quelques centimètres d'isolation bienvenus sans travaux de grande envergure. Leur atout environnemental est indéniable même s'ils ne permettront jamais d'atteindre des valeurs U de mur conformes aux exigences de la PEB sans être complétés par un panneau isolant en façade.

Au final, une configuration qu'on pourrait qualifier d'idéale du point de vue environnemental et économique est atteinte avec : une post-isolation des murs creux avec des fibres de laine de verre et un panneau de polystyrène enduit en façade, une insufflation d'ouate de cellulose en toiture et l'installation de châssis bois double vitrage. Par rapport au scénario avec le meilleur bilan financier, cette solution permet pour 1% d'investissement financier supplémentaire de réaliser 13% d'économies environnementales en plus.

Il est utile de rappeler que le grand nombre d'hypothèses méthodologiques et la variabilité des sources de données entraînent des incertitudes quant aux résultats obtenus. Ceux-ci doivent donc être pris avec précaution et il importe de se focaliser sur les ordres de grandeur plutôt que sur les chiffres exacts.

Une des façons de compléter cette étude serait d'élargir le champ de celle-ci en multipliant les scénarios et les matériaux étudiés, car les configurations possibles sont très nombreuses et je n'ai pu en étudier que quelques-unes dans le cadre de ce travail. Puisque cette étude ne porte que sur une seule typologie de bâtiment, il serait également pertinent de reproduire la démarche pour les autres catégories de logement prioritaires pour la rénovation : les maisons mitoyennes, généralement urbaines datant d'avant 1919 et les maisons isolées (rurales) d'avant 1919 (Kints, 2008).

Enfin, j'aurais souhaité tenir compte de la séquestration de CO₂ dans mes calculs afin de rendre compte de ces effets pour les matériaux d'origine bio-sourcée. Mais cela n'a pas été possible car j'ai dû m'aligner sur la méthode de TOTEM. Il serait intéressant de reproduire cette étude en choisissant des données environnementales intégrant ce carbone biogénique afin de constater si les conclusions de cette étude sont modifiées.

C'est donc sur ces pistes d'amélioration que se conclut ce travail, riche en apprentissages, qui a bouleversé mes opinions de départ quant à l'importance du choix des matériaux utilisés dans la rénovation des logements en Belgique.

Allacker, K. (2010). *Sustainable building - the development of an evaluation method*. Thèse de doctorat de la faculté d'ingénieur civil architecte de l'université catholique de Louvain, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

Allacker, K., De Troyer, F. (2013), *Moving towards a more sustainable Belgian dwelling stock : the passive standard as the next step ?* College Publishing, 8(2), 112–132.

Attia, S., Mlecnik, E. (2012). *Avoiding the elephant : the net and nearly zero energy building target in Belgium*. In World Sustainable Energy Days.

Attia, S., Mustafa, A., Giry, N., Popineau, M. (2020), *Developing two benchmark models for post-world war residential buildings*, Energy and Buildings, 402, 15 December, 11653.

Attia, S., (2018), *Regenerative and Positive Impact Architecture : Learning from Case Studies*, Springer International Publishing, London, UK978-3-319-66717-1.

Attia, S., (2016), *Towards regenerative and positive impact architecture : A comparison of two net zero energy buildings*, Sustainable Cities and Society, 26, 393-406.

Baveye, J., Valenduc, C. (2011). *Are "environmental" tax incentives efficient ?* Bulletin de Documentation, 139–166.

Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A. (2013), *Life cycle assessment in the construction sector : a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379-388, DOI : 10.1016/j.rser.2013.05.011.

CEN (2012), EN 15804 :2012 : *Sustainability of construction works - Environmental product declaration - Core rules for the product category of construction products*.

CEN (2011), EN 15978 :2011 : *Sustainability assessment of construction works - assessment of environmental performance of buildings - calculation method*.

Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. et al. (2020), *Buildings as a global carbon sink*, Nature Sustainability, 1-8.

Cré, J., Mlecnik, E., Kondratenko, et al. (2012), *Developing an integrated offer for Sustainable Renovations*, In Retrofit 2012, Salford Manchester, UK, 24-25 January 2012. University of Salford Manchester.

Delvenne, F. (2016), *Analyse du cycle de vie et coûts du cycle de vie de matériaux régénératifs : Analyse comparative dans le secteur résidentiel belge*, mémoire de Master ingénieur-architecte, Université de Liège.

Dgo4 (2014), *Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie*, Chapitre 4 : analyse du bâti.

Dubois, M., Allacker, K. (2015), *Energy savings from housing : Ineffective renovation subsidies vs efficient demolition and reconstruction incentives*, Energy Policy, 86, 697–704.

EnergieSprong France (2018), *Guide pratique à destination des bailleurs sociaux*, accessible à l'adresse <http://www.energiesprong.fr>.

European Commission (2014), *2030 climate and energy goals for a competitive, secure and low-carbon EU economy*, Bruxelles.

European Commission – Department : Energy (2020), *Energy efficiency in buildings*, Bruxelles.

European Commission (2019), *Energy balance sheets, 2017 DATA*, Bruxelles, DOI : 10.2785/10223.

Gendebien, S., Georges, E., Bertagnolio, S., Lemort, V. (2015), *Methodology to characterize a residential building stock using a bottom-up approach : a case study applied to Belgium*, International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 4(0), 71–88.

Gluch, P., Baumann, H. (2004), *The life cycle costing (LCC) approach : a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making*, Building and Environment, 39, 571-580, DOI : 10.1016/j.buildenv.2003.10.008

Gouvernement Wallon (2016), *Exigences applicables à partir du 1er janvier 2017*, Annexe 3 à l'arrêté du Gouvernement wallon du 28 janvier 2016 modifiant l'arrêté du Gouvernement wallon du 15 mai 2014 portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments.

GRAMITHERM Europe SA (2019), *FDES V1.0 - Déclaration environnementale et sanitaire*, EPD réalisée par le bureau d'étude ATARA SAS (France), accessible à l'adresse : <http://gramitherm.ch/produits/?lang=fr#tab-id-1>.

Haavik, T., Mlecnik, E., Rødsjø, A. (2012), *From Demonstration Projects to Volume Market of Sustainable Construction*, Energy Procedia, 30, 1411–1421.

Hauglustaine, JM., Monfils, S. (2009), *Etude énergétique et typologique du parc résidentiel wallon en vue d'en dégager des pistes de rénovation prioritaires*, Programme RENO 2020, Energy and Sustainable Development, EnergySUD.

Hens, H., Verbeeck, G., Verdonck, B. (2001), *Impact of energy efficiency measures on the CO2 emissions in the residential sector, a large scale analysis*, Energy and Buildings, 33(3), 275–281.

Institut de conseils et d'études en développement durable (ICEDD), (2017), *Bilan provisoire pour le secteur domestique et assimilés 2016*, Bilan énergétique Wallonie 2016.

ISO 14040 (2006), *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*, ISO.

ISOHEMP (2017), *Fiche technique – ACV IsoHemp*, EPD réalisée par Liège Université, Faculté des Sciences Appliquées, Chemical Engineering et PEPs, Products, Environment and Processes, accessible à l'adresse à : <https://www.iso hemp.com/fr/documents-techniques#>

European Cellulose Insulation Association (ECIA) (2018), *Environmental Product Declaration*, Bruxelles, EPD publiée par CAPEM (Pays-Bas), EPD réalisée par les bureaux d'étude : Agrodome (Pays-Bas), avniR /cd2e (France), WeLOOP (France).

IWEPS (2020), *Consommation d'énergie par secteur / vecteur en Wallonie*, dernières données régionales disponibles au : 01/06/2020, accessible à l'adresse : <https://www.iweps.be/indicateur-statistique/consommation-denergie-secteur-vecteur/>.

IWEPS (2020), *Réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) en Wallonie*, dernières données régionales disponibles au : 01/06/2020, accessible à l'adresse : <https://www.iweps.be/indicateur-statistique/reduction-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-ges/>

Kints, C., (2008), *La rénovation énergétique et durable des logements wallons, analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires*, Architecture et Climat, Université catholique de Louvain.

Le Quéré, C., Jackson, R.B., Jones, M.W. et al. (2020), *Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement*, Nat. Clim. Chang. 10, 647–653, <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>.

Lévy, P., (2010), *La rénovation écologique, principes fondamentaux, Exemples de mise en oeuvre*, éditions Terre Vivante, ISBN 978-2-914717-76-2

Mlecnik, E. (2010), *Challenges and opportunities of the passive house concept for retrofit*, In CIB World Congress 2010, Building a Better World, 2010, May 10-13, Salford UK. University of Salford.

Mlecnik, E., Cré, J., Kondratenko, I., Hilderson, W. (2011), *Innovations in Very Low Energy Retrofit Projects*, Conference Proceedings of PLEA2011, Louvain-La-Neuve, Belgium, 6.

Mlecnik, E., Kondratenko, I. (2012), *La rénovation en profondeur des bâtiments en Europe peut créer deux millions d'emploi-Rénovation intégrale= big business*, Be Passive, 13, 2012.

Oliva, JP., Courgey, S. (2010), *L'isolation thermique écologique : conception, matériaux, mise en oeuvre, neuf et réhabilitation*, éditions Terre Vivante, ISBN 978-2-914717-88-5.

OVAM, Bruxelles Environnement, SPW, (2018), *Guide TOTEM, Une méthodologie belge pour évaluer les impacts environnementaux des bâtiments*, accessible à l'adresse : <https://www.totem-building.be/pages/download/list.xhtml>.

OVAM, Bruxelles Environnement, SPW, (2020), *Foire aux Questions pour l'utilisation de l'outil Totem, Update 25/05/20*, accessible à l'adresse : <https://www.totem-building.be/pages/download/list.xhtml>.

OVAM (2020), *Environmental profile of building elements [update 2020]*, accessible à l'adresse : <https://www.totem-building.be/pages/download/list.xhtml>.

OVAM (2017), *Annex : Monetisation of the MMG method (update 2017)*, accessible à l'adresse : <https://www.totem-building.be/pages/download/list.xhtml>.

Pombo, O., Allacker, K., Rivela, B., Neila, J., (2016), *Sustainability assessment of energy saving measures : a multi-criteria approach for residential buildings retrofittingndash, A case study of the Spanish housing stock*, Energy and Buildings , <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.019>

Protopapadaki, C., Reynders, G., Saelens, D. (2014), *Bottom-up modelling of the Belgian residential building stock : impact of building stock descriptions*, In Proceedings of the 9th International Conference on System Simulation in Buildings-SSB2014.

Ratna Reddy, V., Kurian, M., Ardakanian, R. (2015), *Life-cycle cost approach for management of environmental resources*. Springer Cham Heidelberg, New York - Dordrecht - London, DOI : 10.1007/978-3-319-06287-7.

Reiter, S., Marique, AF., (2012), *Toward Low Energy Cities : A Case Study of the Urban Area of Liège, Belgium*, Industrial Ecology, Volume 16, Issue 6, Special Issue : Sustainable Urban Systems, Pages 829-838, <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00533.x>.

Ritzen, MJ., Haagen, T., Rovers, R. et al. (2016), Environmental impact evaluation of energy saving and energy generation : Case study for two Dutch dwelling types, Building and Environment, DOI : 10.1016/j.buildenv.2016.07.020.

Ruellan, G. (2016), *Les problématiques de la rénovation du stock bâti dans la ville de demain : résultats d'une étude initiale en Belgique*. Presented at the 34ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Liège.

Ruellan. G. (2016), *Etat du marché de la rénovation du bâti résidentiel en Belgique, Revue de littérature sur l'état du bâti existant : le marché de la rénovation, ses enjeux et ses barrières*. Sustainable Buildings Design Lab, ArGEnCo Dept, Faculty of Applied Sciences, University of Liège (ULg).

SPF santé publique (2019), *B-EPD : Frequently Asked Questions*, accessible à l'adresse : www.health.belgium.be/fr/le-programme-epd-belge-b-epd.

SPW (2019), Contribution de la Wallonie au plan fédéral Energie-Climat 2030 (PNEC2030), approuvé par le gouvernement wallon le 28 Novembre 2019.

SPW Energie (2018), *Exigences PEB du 1er juillet 2019 au 31 décembre 2020*, consulté le 20 Juillet 2020, accessible à l'adresse <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-du-1er-juillet-2019-au-31-decembre-2020.html?IDD=136456&IDC=7224>

SPW Energie (2017), *Exigences PEB à partir du 1er janvier 2021*, consulté le 20 Juillet 2020, accessible à l'adresse <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-a-partir-du-1er-janvier-2021.html?IDC=7224&IDD=114100>

Trachte, S., Salvesen, F. (2014), *Sustainable Renovation of Non Residential Buildings, a Response to Lowering the Environmental Impact of the Building Sector in Europe*, Energy Procedia, 48, 1512–1518.

Union Royale Professionnelle d'Architectes (2017), *Bordereau des prix unitaires 2017*, Architect's House, Bruxelles 1000 Rue Ernest Allardstraat 21.

Van de Voorde, S., Bertels, I., Wouters, I. (2015), *Post-war building materials*, Brussels : Vrije Universiteit Brussel.

Verbeeck, G., Hens, H. (2005), *Energy savings in retrofitted dwellings : economically viable ?* Energy and Buildings, 37(7), 747–754.

Verbeeck G., Hens, H. (2010), *Life cycle inventory of buildings : A calculation method*, Building and Environment, 45 (2010) 1037–1041, DOI :10.1016/j.buildenv.2009.10.012.

Verbeeck G., Hens, H. (2010), *Life cycle inventory of buildings : A contribution analysis*, Building and Environment, 45 (2010) 964–967, DOI :10.1016/j.buildenv.2009.10.003.

Verhoeven, R. (2009), *Pathways to World-Class energy efficiency in Belgium*, McKinsey Company.

Vilches, A., Garcia-Martinez, A., Sanchez-Montanes, B., (2016), Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment : A literature review, Energy and Buildings, 135 (2017) 286–301, [http ://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042](http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042).

Wijnants, L. (2015), *Renovation-innovator : development of sustainable building systems for renovation*, Presented at the DS2BE, Bruxelles.

Wijnants, L., Allacker, K., Trigaux, D., et al. (2015), *Methodological issues in evaluating integral sustainable renovations*, In Proceedings of International Conference, CISBAT 2015 Future Buildings and Districts Sustainability from Nano to Urban Scale (pp. 197–202). LESO-PB, EPFL.

Wordosofer, M., (2018), *L'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment : la vision et l'ambition de la Commission européenne*, Responsabilité et environnement, Avril 2018, Numéro 90, Annales des Mines.