
Rénovation énergétique des logements en Wallonie : Étude d'impact de mesures de rénovation pour un budget limité

Auteur : Massotte, Fanny

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 : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/13853>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Rénovation énergétique des logements en Wallonie : Étude d'impact de mesures de rénovation pour un budget limité

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

Fanny Massotte

Promoteur: Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury:

Ass. RUELLAN Guirec – SDB Lab

Prof. REITER Sigrid - ArGEnCo

GEDIK Gün – Liège-Énergie

Année académique 2021-2022

RESUME

L'exploration du contexte environnemental et énergétique de ces dernières années permet de mettre en évidence l'importance de la rénovation énergétique des logements en Wallonie pour atteindre les objectifs imposés par l'Europe.

Tous les ménages n'étant pas capables, financièrement, d'entreprendre un projet de rénovation énergétique de grande envergure, des aides (primes et prêts à taux zéro) sont mises à leur disposition par la Région wallonne. Mais constatant que le montant du prêt est limité à 60.000€, ce qui est insuffisant pour ce type de grosse rénovation, une question peut se poser : « Pour une habitation wallonne en milieu urbain typique et un investissement financier initial de maximum 60.000€, quelles sont les mesures de rénovation à privilégier ? »

Menée en collaboration avec la plateforme locale de rénovation Liège-Énergie, cette recherche a pour but d'améliorer l'expertise de ce type de structure, en leur proposant une étude d'impact de mesures de rénovation, avec des résultats concrets, sur laquelle s'appuyer pour encourager les particuliers à rénover.

La méthodologie employée peut être résumée par les quatre objectifs opérationnels suivants :

- sélectionner un cas d'étude représentatif des logements wallons en milieu urbain à la performance énergétique très faible ;
- élaborer des scénarios combinant différentes mesures de rénovation en respectant un budget limité à 60.000€ et visant un label énergétique A ;
- étudier l'impact de ces scénarios sur quatre paramètres : consommation d'énergie, émissions de CO₂, surchauffe et coûts sur le cycle de vie ;
- réaliser une étude de sensibilité de ces quatre paramètres.

Les découvertes tirées de cette étude sont les suivantes :

- les mesures de rénovation diminuent la consommation d'énergie, réduisent les émissions de CO₂ en phase d'utilisation et améliorent le confort thermique, surtout en hiver ;
- les mesures d'isolation et de changement du système de chauffe sont les plus performants ;
- les projets de rénovation ne sont pas toujours rentables à moyen-terme (30 ans) mais la rentabilité augmente avec le temps ;
- les prix de l'énergie et leur évolution dans le temps influencent grandement la rentabilité d'un projet de rénovation et plus l'énergie sera chère, plus le projet sera rentable ;
- les coûts de maintenance et de remplacement sont non-négligeables et plus le projet de rénovation est élaboré, plus les coûts seront importants ;
- l'anticipation d'une tarification carbone est avantageuse pour les projets de rénovation et plus la tarification sera sévère, plus le projet sera rentable.

Mots-clés :

Liège, résidentiel, réhabilitation, énergie, émissions de CO₂, confort, coûts

ABSTRACT

Energy renovation of housing in Wallonia: Impact study of renovation measures for a limited budget

The exploration of the environmental and energy context of recent years has made it possible to highlight the importance of the energy renovation of housing in Wallonia in order to achieve the objectives imposed by Europe.

All households that are not financially capable of undertaking a large-scale energy renovation project, aid (bonuses and zero-interest loans) is made available to them by the Walloon Region. But noting that the loan amount is limited to € 60,000, which is insufficient for this type of major renovation, a question may arise: "For a Walloon house in a typical urban environment and an initial financial investment of maximum € 60,000, what are the renovation measures to be favored?"

Conducted in collaboration with the local Liège-Énergie renovation platform, this research aims to improve the expertise of this type of structure, by offering them an impact study of renovation measures, with concrete results, on which lean on to encourage individuals to renovate.

The methodology employed can be summarized by the following four operational objectives:

- select a case study representative of Walloon housing in urban areas with very low energy performance;
- develop scenarios combining different renovation measures while respecting a budget limited to € 60,000 and aiming for an A energy label;
- study the impact of these scenarios on four parameters: energy consumption, CO₂ emissions, overheating and life cycle costs;
- carry out a sensitivity study of these four parameters.

The findings from this study are as follows:

- renovation measures reduce energy consumption, reduce CO₂ emissions during use and improve thermal comfort, especially in winter;
- the insulation and change of the heating system measures are the most efficient;
- renovation projects are not always profitable in the medium term (30 years) but profitability increases over time;
- energy prices and their evolution over time greatly influence the profitability of a renovation project and the more expensive the energy, the more profitable the project;
- the maintenance and replacement costs are not insignificant and the more the renovation project is developed, the more the costs will be important;
- the anticipation of carbon pricing is advantageous for renovation projects and the more severe the pricing, the more profitable the project will be.

Keywords :

Liège, residential, rehabilitation, energy, CO₂ emissions, comfort, costs

REMERCIEMENTS

Je remercie toutes les personnes qui ont œuvré de près ou de loin à la réalisation de mon travail de fin d'étude :

- Mon promoteur, le Prof. Shady Attia, pour son accompagnement tout au long du travail ;
- Les membres du SDB Lab, pour les nombreux conseils qu'ils m'ont donné ;
- Les membres de mon jury, pour la lecture de mon travail ;
- M. Gedik, délégué à la gestion journalière de Liège-Énergie, pour m'avoir familiarisée avec le secteur de la rénovation à Liège et pour m'avoir apporté autant d'aide ;
- Les propriétaires du cas d'étude, pour leurs réponses à toutes mes questions ;
- Mes proches, pour leur soutien indéfectible.

TABLE DES MATIERES

RESUME.....	II
ABSTRACT.....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 CONTEXTUALISATION	1
1.1.1 <i>Enjeux environnementaux</i>	1
1.1.2 <i>Enjeux de la rénovation énergétique</i>	2
1.2 PROBLÉMATIQUE IDENTIFIÉE	4
1.3 TRAVAIL DE RECHERCHE	5
1.3.1 <i>Sujet de recherche et objectifs</i>	5
1.3.2 <i>Contenu du travail</i>	6
2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	8
2.1 ÉTAT DE L'ART : RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE.....	8
2.1.1 <i>Grands principes</i>	8
2.1.2 <i>Instruments de promotion en Europe</i>	10
2.1.3 <i>Stratégies de rénovation en Belgique</i>	13
2.1.4 <i>Outils mis à disposition en Wallonie</i>	15
2.2 CONCEPTS CLÉS	17
2.2.1 <i>Performance énergétique</i>	17
2.2.2 <i>Impacts environnementaux</i>	20
2.2.3 <i>Confort</i>	22
2.2.4 <i>Coûts</i>	24
2.3 OUTIL : DESIGNBUILDER.....	27
2.4 ÉTUDES SIMILAIRES	28
2.4.1 <i>Études ciblées</i>	29
2.4.2 <i>Études globales</i>	30
2.4.3 <i>Manquements</i>	33
3 MÉTHODOLOGIE	35
3.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	35
3.1.1 <i>Questions de recherche</i>	35
3.1.2 <i>Description de l'étude</i>	35
3.1.3 <i>Délimitation de l'étude</i>	37
3.2 SÉLECTION DU CAS D'ÉTUDE.....	38
3.2.1 <i>Élaboration de critères de sélection</i>	38
3.2.2 <i>Sélection de l'habitation</i>	40
3.2.3 <i>Collecte des données</i>	41
3.2.4 <i>Présentation brève de l'habitation</i>	42
3.3 MODÉLISATION DU CAS DE BASE	45
3.3.1 <i>Paramétrage</i>	45
3.3.2 <i>Calibration et validation</i>	47
3.4 ELABORATION DES SCÉNARIOS DE RÉNOVATION	49
3.4.1 <i>Choix des variables</i>	49
3.4.2 <i>Collecte des données</i>	51
3.4.3 <i>Construction des scénarios</i>	51
3.4.4 <i>Budgétisation des scénarios</i>	54
3.5 MODÉLISATION DES SCÉNARIOS DE RÉNOVATION	55
3.5.1 <i>Paramétrage</i>	55
3.5.2 <i>Étude de sensibilité</i>	60
3.6 TRAITEMENT DES DONNÉES	62
3.6.1 <i>Choix des paramètres étudiés</i>	62

3.6.2	Consommation d'énergie.....	63
3.6.3	Émissions de CO ₂	64
3.6.4	Confort thermique	64
3.6.5	Coûts.....	65
4	RÉSULTATS.....	69
4.1	CAS DE BASE.....	69
4.1.1	Consommation d'énergie.....	69
4.1.2	Émissions de CO ₂	70
4.1.3	Confort thermique	70
4.1.4	Coûts sur le cycle de vie	70
4.2	SCÉNARIO R0.....	71
4.2.1	Consommation d'énergie.....	72
4.2.2	Emission de CO ₂	72
4.2.3	Confort thermique	73
4.2.4	Coût du cycle de vie.....	73
4.3	SCÉNARIO RI.....	74
4.3.1	Consommation d'énergie.....	74
4.3.2	Emission de CO ₂	75
4.3.3	Confort thermique	75
4.3.4	Coût du cycle de vie.....	76
4.4	SCÉNARIO RM.....	77
4.4.1	Consommation d'énergie.....	77
4.4.2	Emission de CO ₂	78
4.4.3	Confort thermique	78
4.4.4	Coût du cycle de vie.....	79
4.5	SCÉNARIO RS.....	80
4.5.1	Consommation d'énergie.....	80
4.5.2	Emission de CO ₂	81
4.5.3	Confort thermique	82
4.5.4	Coût du cycle de vie.....	82
4.6	SCÉNARIO RR.....	83
4.6.1	Consommation d'énergie.....	83
4.6.2	Emission de CO ₂	84
4.6.3	Confort thermique	85
4.6.4	Coût du cycle de vie.....	85
4.7	SCÉNARIO R+.....	86
4.7.1	Consommation d'énergie.....	86
4.7.2	Emission de CO ₂	87
4.7.3	Confort thermique	87
4.7.4	Coût du cycle de vie.....	88
4.8	ANALYSE COMPARATIVE.....	89
4.8.1	Consommation d'énergie.....	89
4.8.2	Emission de CO ₂	90
4.8.3	Confort thermique	91
4.8.4	Coûts sur le cycle de vie	92
4.9	CONCLUSION.....	93
5	DISCUSSION.....	96
5.1	DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	96
5.2	DÉCOUVERTES MAJEURES.....	98
5.3	FORCES ET LIMITATIONS DE L'ÉTUDE	98
5.3.1	Validité des résultats.....	98
5.3.2	Reproductibilité de l'étude.....	100
5.3.3	Limitations	100
5.4	IMPACT ET PERSPECTIVES	101
5.4.1	Impact du travail.....	101

5.4.2 Pistes de recherche	102
6 CONCLUSION.....	104
LISTE DES FIGURES.....	107
LISTE DES TABLEAUX.....	110
RÉFÉRENCES	111
BIBLIOGRAPHIE	111
ENTRETIENS	118
ANNEXES	119
ANNEXE 1 - ABRÉVIATIONS UTILISÉES	119
ANNEXE 2 – TABLEURS DE PARAMÉTRAGE DU MODÈLE	120
ANNEXE 3 – TABLEUR DE TRAITEMENT DES DONNÉES	120
ANNEXE 4 – DOCUMENT RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS.....	120

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTUALISATION

1.1.1 Enjeux environnementaux

Le dérèglement climatique auquel est confronté le monde depuis quelques années n'est plus à prouver et celui-ci est notamment dû aux émissions de gaz à effet de serre (GES), le plus connu étant le CO₂. En 2018, l'augmentation des émissions de CO₂ mondiales par rapport à 1990 était de 63%. Si l'Europe fait figure de bon élément (-23%), les États-Unis, le Moyen-Orient, le Japon et la Chine sont en grande partie responsable de cette problématique environnementale. Néanmoins, une prise de conscience mondiale est prise sur les dommages que les GES risquent de provoquer à long terme : perturbations atmosphériques, rejets toxiques... (Hauglustaine & Simon, 2018)

Le secteur du bâtiment n'est pas étranger à cette situation. En Belgique, le chauffage des bâtiments constitue près de 20% des émissions de GES (14% pour le résidentiel et 5% pour le tertiaire). Si ces émissions diminuent pour le secteur résidentiel depuis 1990 (-22%), elles n'en restent pas moins significatives. (Climat, 2019)

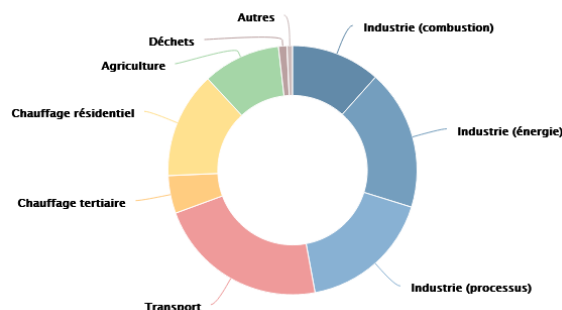


Figure 1-1 : Part et évolution des secteurs dans les émissions totales de GES en 2019 (%) (Climat, 2019)

La Belgique a ainsi mis en place un Plan national énergie-climat 2021-2030, qui a été remis à la Commission européenne en novembre 2019. Ce plan « indique les objectifs et mesures les plus importantes pour la politique énergétique et climatique pour la période 2021-2030 ». (PNEC, s. d.)

Les engagements y sont les suivants :

- Pour la réduction des émissions de GES : « réduire de 35% en 2030 par rapport à 2005 pour les secteurs non-ETS ¹ (transport, bâtiments,

¹ Emission Trading Scheme : secteurs concernés par le système communautaire d'échange de quotas d'émission

agriculture, déchets), soit 5% de plus que la moyenne européenne, répartis entre les régions (37% pour la RW, 32% pour la RBC et 35% pour la RF).»

- Pour la production d'énergies renouvelables : « produire 18,4% de la consommation brute d'énergie d'ici 2030 (32% au niveau européen) (revu à 17% dans le PNEC définitif 2019) »

En Belgique, l'énergie est matière régionale. Les directives doivent donc être transposées par les trois régions, individuellement. Elles doivent répondre aux mêmes objectifs mais les niveaux d'exigence peuvent être différents. (Maison Passive pmp, 2020b)

1.1.2 Enjeux de la rénovation énergétique

Le parc de logement wallon (environ 1.650.000 logements) est ancien : 75% des logements datent d'avant 1985 (première réglementation thermique wallonne). Il est également très peu isolé puisque 40% des logements ont des toitures non-isolées, 64% des murs non-isolés et 11% sans isolation du tout. 19% des bâtiments ont également toujours du simple vitrage. La performance énergétique moyenne est donc le label F, ce qui correspond à une consommation théorique de 434kWh/m².an. Et pourtant, le taux de rénovation naturel n'est que de 1% par an. Dans le cadre de la stratégie wallonne de rénovation à long terme, il devrait donc augmenter de 1 à 3%. (Maison Passive pmp, 2020b)

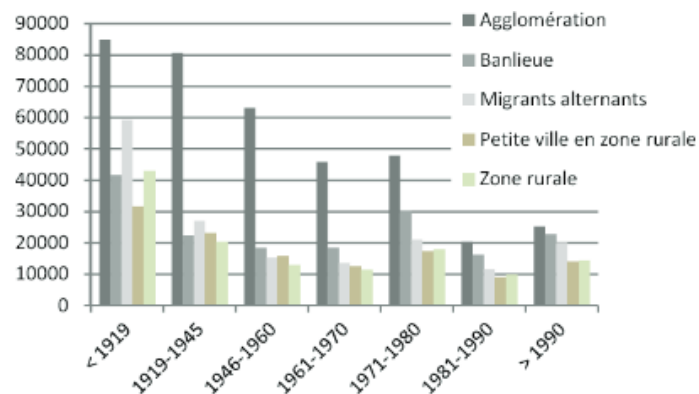


Figure 1-2 : Croisement entre le degré d'urbanisation et l'âge des logements wallons (Monfils & Hauglustaine, 2011, p.2)

Les opportunités de la rénovation sont pourtant nombreuses :

- patrimonial : sauvegarde du patrimoine bâti
- urbanistique : lutte à l'étalement urbain
- sociétal : lutte contre la précarité énergétique = manque de moyens financiers par rapport aux besoins de base du ménage, d'une consommation d'énergie trop élevée par la mauvaise qualité du logement et les tarifs énergétiques en hausse (21.7% des ménages belges)
- économique : secteur créateur d'activités et d'emploi
- diminution de la dépendance aux énergies fossiles et encouragement à l'utilisation d'énergies renouvelables

(Maison Passive pmp, 2020b, p. 15)

Pour parvenir à ses objectifs, l'Union européenne oblige ses Etats membres à élaborer et mettre en œuvre des stratégies nationales à long terme en matière de rénovation des bâtiments. Chaque pays membre se doit de mener son parc de bâtiments vers une haute performance énergétique et vers une sobriété en carbone. (Maison Passive pmp, 2020b, p. 15)

En Wallonie, c'est la Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme qui a transposé la Directive (UE) 2018/844 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018 (dernière mise à jour). (SPW Énergie, 2020b)

Cette stratégie se veut être le « maillon clé des politiques de réduction des émissions de GES, dans laquelle la Wallonie s'est engagée en visant « la neutralité carbone au plus tard en 2050, avec une étape intermédiaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) de 55 % par rapport à 1990 d'ici 2030 » (SPW Énergie, 2020b, p. 3)

De plus, elle « vise à mobiliser les investissements dans la rénovation du parc de bâtiments publics et privés, à usage résidentiel et à usage tertiaire, et s'aligne sur les principes du Gouvernement wallon confirmés notamment dans la Déclaration de Politique régionale. Elle vise à constituer un parc immobilier à haute efficacité énergétique et décarboné d'ici à 2050, en assurant aux occupants des espaces sains, confortables et au service des activités qu'ils y mènent » (SPW Énergie, 2020b, p. 3)

Trois enjeux principaux sont donc concernés par la stratégie :

- l'amélioration du confort et de la santé des occupants ;
- la diminution des impacts environnementaux dus à l'occupation des bâtiments ;
- la réduction de la dépendance énergétique de la région.

(SPW Énergie, 2020b)

Concrètement, les objectifs à rencontrer pour le parc de bâtiment wallon sont :

- Pour le résidentiel : « tendre en 2050 vers le label PEB A décarboné en moyenne pour l'ensemble du parc de logements et viser en priorité la rénovation profonde des logements les moins performants, tout en assurant que tout projet de rénovation s'inscrive dans une réflexion globale et cohérente avec les objectifs de la région, structurée dans l'échéancier d'implémentation de la stratégie de rénovation » (SPW Énergie, 2020b, p.4)
- Pour le tertiaire : « tendre en 2040 vers un parc de bâtiments tertiaires efficace en énergie et neutre en carbone pour le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, le refroidissement et l'éclairage » (SPW Énergie, 2020b, p.4)

Pour atteindre ces objectifs, les travaux de rénovation sur les habitations à faible performance thermique doivent amener à une diminution de la consommation d'énergie d'environ 75%. Et pour encourager les propriétaires à rénover, la Wallonie mets de nombreux outils à disposition, notamment via la campagne Walloreno. (Walloreno, 2021b)

Parmi ces outils, se trouvent trois types d'aide financière qui sont proposées aux particuliers : les primes Habitation, le prêt à taux réduit sans primes (Rénoprêt) et le prêt à taux réduit avec primes (Rénopack).

Le prêt à taux réduit est un « prêt à tempérament à un taux débiteur de 0% destiné à financer des travaux de rénovation d'un logement (économies d'énergie, salubrité, sécurité, adaptation au handicap) ». (Liège-Énergie, s. d.-b) A l'heure actuelle, le montant accordé peut s'élever jusqu'à un maximum de 60.000€ et la durée du crédit, fixée par l'organisme prêteur, peut aller jusqu'à 30 ans. Cette aide s'adresse principalement aux propriétaires, voire copropriétaires, de logements de plus de 15 ans. Les travaux finançables ainsi sont les travaux de rénovation, d'adaptation, d'économie d'énergie, de salubrité et de sécurité.

1.2 PROBLÉMATIQUE IDENTIFIÉE

Cette contextualisation en matière d'énergie et de rénovation énergétique qui vient d'être réalisée peut être schématisée comme suit :

Environnement menacé

- Réduction des GES
 - Amélioration de la performance énergétique du parc de bâtiment
 - Rénovation énergétique des logements
 - Accompagnement financier des propriétaires

En effet, tous les propriétaires n'ont pas le budget suffisant pour financer de lourds travaux de rénovation et atteindre une performance énergétique très élevée de leur logement. Il leur est alors possible de requérir à des aides financières, telles que les primes Habitations ou le prêt à taux zéro. Mais là aussi, le plafond du prêt s'élève à 60.000€, insuffisant pour ce type de rénovation.

Une approche est alors tentée par la Région wallonne, via le projet de Plateformes locales de rénovation : améliorer la performance énergétique du stock bâti existant par la rénovation plus sommaire (label F/G vers un label A), donc plus abordable, d'un grand nombre de logements, plutôt que par la rénovation optimale (A+, passif, Q-ZEN...) mais très coûteuse d'une poignée d'entre eux.

Un sujet d'étude s'est donc imposé :

« Rénovation énergétique des logements en Wallonie : étude d'impact de mesures de rénovation pour un budget limité »

Face à ce sujet, la volonté de collaborer avec la plateforme locale de rénovation Liège-Énergie est venue naturellement. Il s'agit d'une ASBL œuvrant localement (permanences, accompagnement de projet, actions...) afin de réduire durablement la consommation d'énergie dans les logements liégeois.

Liège-Énergie est chargée de trois missions principales : l'aide dans l'accès aux aides financières (prêts à taux zéro et primes), la mise en œuvre d'une politique sociale préventive en matière d'énergie et la mise à disposition des citoyens d'informations, conseils et services, forte de son expertise et de son expérience dans

le domaine de l'énergie. L'ASBL est notamment active dans l'accompagnement des démarches administratives de financement de travaux de rénovation énergétique des logements. Cela va de la préparation des dossiers à leur introduction auprès des organismes prêteurs, en passant par la recommandation d'auditeurs et entrepreneurs partenaires. Plus de 2.000 projets de rénovation ont ainsi été accompagnés à ce jour.

Dans la majorité des cas, l'accompagnement s'aligne sur la demande initiale du citoyen. Celui-ci constate généralement chez lui une problématique : une réparation à faire, un changement à effectuer, un manquement auquel remédier... Il cherche alors à savoir quelles sont les aides à sa disposition ou quels entrepreneurs ou auditeurs peuvent être recommandés.

Il arrive toutefois que des conseils sur d'éventuels autres travaux à plus long terme soient également donnés, en particulier si la sécurité ou la salubrité du bien est en jeu ou si les potentielles économies d'énergie supplémentaires sont importantes. Dans ces cas-là, il arrive que le citoyen, malgré les recommandations de la plateforme ou de l'auditeur et malgré les primes qui sont à sa disposition, ne parvienne pas à concevoir les avantages environnementaux, économiques et en termes de confort à long terme de certains travaux supplémentaires. Soit les gains potentiels assurés ne sont pas assez concrets, soit ils ne surpassent pas les inconvénients occasionnés : investissement initial, emprunts, démarches administratives, travaux lourds...

Ainsi, il m'a été confirmé l'intérêt pour la plateforme d'observer les résultats d'une étude comparative portant sur l'impact de différentes mesures de rénovation pour un projet de rénovation de logement soumis à un budget limité. Le cas d'étude se voulant représentatif des logements auxquels Liège-Énergie a régulièrement affaire, les résultats concrets de cet exemple, pourraient aider à convaincre les citoyens perdus, réticents ou simplement en recherche de conseils.

(Liège-Énergie, s. d.-a) (*Entrevue 1 avec Liège-Énergie, 28 septembre 2021*)

1.3 TRAVAIL DE RECHERCHE

1.3.1 Sujet de recherche et objectifs

La question principale à laquelle ce travail va tenter d'apporter une réponse est :

« Pour une habitation wallonne en milieu urbain typique et un investissement financier initial de maximum 60.000€, quelles sont les mesures de rénovation à privilégier ? »

Le but ultime de cette recherche est d'améliorer l'expertise des plateformes de rénovation énergétique wallonnes, ou structures équivalentes, en mettant à leur disposition une étude d'impact de mesures de rénovation, avec des résultats concrets, sur laquelle s'appuyer pour conseiller et convaincre les particuliers de rénover.

Pour y parvenir, plusieurs objectifs opérationnels, s'alignant sur la Stratégie wallonne de rénovation, sont fixés :

- sélectionner un cas d'étude représentatif des logements wallons en milieu urbain à la performance énergétique très faible ;
- élaborer des scénarios combinant différentes mesures de rénovation en respectant un budget limité à 60.000€ et permettant d'atteindre in fine un label énergétique A ;
- étudier l'impact de ces scénarios sur quatre paramètres : consommation d'énergie, émissions de CO₂, surchauffe et coûts sur le cycle de vie ;
- réaliser une étude de sensibilité de ces quatre paramètres.

Cette étude et ses résultats s'adressent à un large panel d'individus. Elle est avant tout destinée aux professionnels des plateformes de rénovation énergétique, experts et conseillers en énergie ou communication. A travers eux, sont également visés les particuliers souhaitant rénover leur habitation avec un budget limité ainsi que les auditeurs logement. Mais ce travail de recherche peut aussi intéresser les ingénieurs, les architectes ou tout autre professionnel du milieu de la construction ou de l'énergie.

1.3.2 Contenu du travail

Le travail se structure en quatre chapitres : revue de la littérature, méthodologie, résultats et discussion.

Le chapitre 2 « Revue de la littérature » est organisé en quatre parties. D'abord, le sujet traité tout au long de ce travail, la rénovation énergétique, est défini et exploré. Ensuite, les concepts clés à connaître pour la bonne mise en œuvre de l'étude sont développés : performance énergétique, impacts environnementaux, confort et coûts. Puis, l'outil principal utilisé pour mener l'étude, DesignBuilder, est brièvement présenté. Pour finir, une revue des études similaires permet de mettre en évidence les manquements dans la littérature, auxquels la recherche pourrait remédier.

Le chapitre 3 « Méthodologie » débute par la description de la méthodologie générale. Les cinq étapes qui la constituent sont ensuite présentées en détail :

- sélection du cas d'étude ;
- modélisation du cas de base ;
- élaboration des scénarios de rénovations ;
- modélisation des scénarios de rénovation ;
- traitement des données.

Le chapitre 4 « Résultats » expose, pour chaque scénario, l'ensemble des résultats obtenus par mise en œuvre de la méthodologie. Les quatre paramètres étudiés sont la consommation d'énergie, les émissions de CO₂, le confort thermique et les coûts à long terme. Le chapitre se conclut sur une analyse comparative entre tous les scénarios.

Le chapitre 5 « Discussion » est composé de quatre sections. Pour commencer, les résultats présentés au chapitre précédent sont discutés, notamment à la lumière de l'avis de Liège-Énergie. S'en suit l'énoncé des découvertes majeures réalisées au moyen de cette étude. Par la suite, l'étude en elle-même est discutée, par un récapitulatif de ses forces et de ses limitations. Enfin, le chapitre finit par le développement de l'impact potentiel du travail ainsi que de ses perspectives, en particulier en termes de recherches complémentaires possibles.

Le travail se termine sur une conclusion, où sont récapitulées les principales composantes de ce travail de recherche.

2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La contextualisation menée dans l'introduction a permis de détacher un sujet de recherche pouvant répondre à une problématique actuelle. Mais avant de se lancer dans l'élaboration d'une méthodologie, une revue de la littérature sur le sujet et sur des notions associées doit être effectuée.

Ce deuxième chapitre est composé de quatre sections. Premièrement, le sujet au cœur de ce travail, la rénovation énergétique, est défini et développé. Deuxièmement, les concepts clés en lien avec la méthodologie à mettre en place sont explorés : performance énergétique, impacts environnementaux, confort et coûts. Troisièmement, l'outil central de cette étude, le logiciel DesignBuilder, est rapidement présenté. Quatrièmement, une revue des études similaires, gravitant autour du même sujet, vise à mettre en avant les manquements dans la recherche, auxquels ce travail pourrait remédier.

2.1 ÉTAT DE L'ART : RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

2.1.1 Grands principes

Avant toute chose, il est nécessaire de définir davantage le concept de « rénovation énergétique » : qu'entend-t-on exactement par cette expression, quelles sont les motivations, comment et quand la mettre en œuvre... ?

Quoi ?

Charlot-Valdieu et Outrequin (2018) établissent les définitions suivantes :

Réhabilitation énergétique : opération pour laquelle « l'amélioration énergétique doit être accompagnée d'une amélioration qualitative du logement et du bâtiment, en associant la problématique de l'énergie à celle de la qualité d'usage du logement : confort, santé[...] » (p. 321)

Réhabilitation énergétique totale : opération qui « consiste à rechercher simultanément toutes les pistes d'amélioration de la performance énergétique du bâtiment, en s'interrogeant sur les sept postes qui conduisent à réduire la consommation d'énergie : amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe (murs, planchers bas, toitures, menuiseries), amélioration de la ventilation, efficacité des systèmes de chauffe et enfin comportement des usagers plus économe » (p. 321)

La formulation « rénovation énergétique » étant plus répandue en Wallonie, celle-ci sera utilisée dans ce travail afin de globaliser ces deux définitions.

Pourquoi ?

Au-delà des enjeux pour la collectivité abordés dans l'introduction, la rénovation énergétique des logements est porteuse de bénéfices pour les propriétaires qui entreprennent les travaux.

Si la réduction de la consommation d'énergie est à la base des projets de rénovation, il ne s'agit pas souvent de la préoccupation première des propriétaires. Selon Charlot-Valdieu et Outrequin (2018), qui se sont penchés sur les facteurs motivateurs de projet, l'économie d'énergie seule ne suffit à motiver que 21% des ménages.

L'objectif prioritaire de 71% des ménages qui se lancent dans la rénovation de leur logement est, en réalité, l'amélioration de leur qualité de vie : confort thermique, confort acoustique, éclairage artificiel et naturel, agencement des espaces... (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2018)

Une autre bonne raison de rénover son habitation est l'amélioration de la qualité sanitaire du logement, en particulier de l'air intérieur. Un air sain permet notamment de prévenir les problèmes d'humidité, récurrents dans les habitations anciennes. Cette pathologie se manifeste parfois par de la moisissure, qui peut provoquer allergies et irritations chez certains individus. (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2018)

Réaliser des économies sur le long terme est également un attrait pour certains propriétaires. Les gains peuvent avoir lieu à plusieurs niveaux : diminution de la facture énergétique (ce qui permet d'être moins dépendant des variations des prix des énergies), augmentation de la valeur immobilière du bien (partiellement récupérable à la vente), prévention de dégradations futures (notamment à cause de l'humidité)... (Walloreno, 2021a)

Un dernier bénéfice pouvant aussi être rencontré à travers un projet de rénovation, est l'amélioration esthétique, extérieure ou intérieure, du bâti. Il s'agit généralement d'un effet secondaire positif de travaux qui doivent être réalisés, par exemple l'isolation des parois. Mais il faut rester vigilant au fait que toutes les modifications d'aspect ne sont pas réalisables (considérations patrimoniales, prescriptions urbanistiques...). (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2018)

Comment ?

Les projets de rénovation énergétique répondent à des enjeux à la fois techniques, environnementaux, humains et économiques. Ils devraient, d'après Charlot-Valdieu et Outrequin (2018), suivre quatre grands principes :

1. *Sobriété énergétique* (diminution du gaspillage d'énergie par révision des habitudes de consommation des occupants ou futurs occupants) ;
2. *Prise en compte du confort et de la santé des occupants* (renouvellement d'air, confort thermique estival et hivernal) ;
3. *Efficacité énergétique* (réduction des consommations d'énergie par une amélioration de la performance de l'enveloppe et des systèmes producteurs de chaleur) ;
4. *Recours aux énergies renouvelables* (satisfactions des besoins en énergie avec un moindre impact sur l'environnement).

Pour cela, plusieurs dispositifs de rénovation énergétique peuvent être mis en œuvre dans un projet. Les principaux postes concernés sont la thermique du bâtiment (isolation des parois - murs, toitures, planchers - et menuiseries),

l'étanchéité à l'air de l'enveloppe, l'efficacité des systèmes générateurs de chaleur (chaudière au gaz, à pellets, pompe à chaleur), le renouvellement d'air (ventilation naturelle, mécanique à simple/double flux) et l'utilisation d'énergies renouvelables (biomasse, solaire thermique/photovoltaïque, géothermie). (SPW Énergie, 2016a)

Quand ?

Charlot-Valdieu et Outrequin (2018) reprennent les préconisations du Plan Bâtiment Durable² quant aux moments favorables à la rénovation de son logement. Les occasions à privilégier seraient :

- les transactions immobilières (par exemple, une vente) ;
- les changements de destination ;
- le lancement de travaux (extension, ravalement de façade, réparation ou changement d'équipements...) ;
- l'adaptation au vieillissement.

2.1.2 Instruments de promotion en Europe

Stratégies de rénovation énergétique

Par la Directive Efficacité Énergétique 2012/27/EU (art. 4), puis la Directive sur la Performance énergétique des bâtiments 2018/844 qui révisé la Directive 2010/31/UE, chaque État membre de l'Union européenne est tenu de rédiger sa propre stratégie de rénovation nationale à long terme, sinon plusieurs stratégies régionales (par exemple, en Belgique). L'énoncé est le suivant :

« La directive modificative (UE) 2018/844 oblige les pays de l'UE à établir des stratégies de rénovation à long terme pour soutenir la rénovation des bâtiments résidentiels et non résidentiels en parc immobilier à haute efficacité énergétique et décarboné d'ici à 2050. Ces stratégies devraient définir une feuille de route contenant des mesures et des indicateurs de progrès mesurables en vue d'atteindre, d'ici à 2050, l'objectif à long terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans l'UE de 80 à 95% par rapport au niveau de 1990. La feuille de route doit prévoir des jalons indicatifs pour 2030, 2040 et 2050 et préciser la manière dont ils contribuent à la réalisation des objectifs de l'UE en matière d'efficacité énergétique conformément à la directive 2012/27/UE. » (EUR-Lex, 2021)

Instrumentalisation

A delà de ces stratégies, il existe de nombreux instruments visant à encourager la rénovation énergétique, qu'ils soient appliqués à l'échelle européenne, nationale, régionale ou locale. Qu'ils soient réglementaires, économiques, financiers ou communicationnels, ils permettent de concrétiser et mettre en action les objectifs fixés dans les stratégies de rénovation.

² Plan français lancé en 2009 avec pour objectif de « favoriser la mise en œuvre des objectifs d'efficacité énergétique et environnementale » (Plan Bâtiment Durable, 2021)



Figure 2-1 : Types d'instruments visant à stimuler la rénovation énergétique (CCERCB, 2021)

Démarches remarquables

Parmi tout cela, deux démarches, innovantes et en plein essor, méritent d'être mises en lumière.

La première, EnergieSprong (« saut énergétique »), est une méthodologie qui a si bien fait ses preuves dans son pays d'origine, les Pays-Bas, qu'elle s'est exportée, depuis, dans d'autres pays : Angleterre, France, Allemagne... Un projet pilote, Reno+, sera même mis à l'essai sous peu en Wallonie. (SPW, 2021b)

EnergieSprong est une approche globale et innovante qui consiste à « déployer à grande échelle des rénovations énergétiques zéro énergie en démocratisant l'accès au plus grand nombre grâce à l'atteinte d'un équilibre économique sans subvention. Ces rénovations réalisées en site occupé et en un temps court garantiront une qualité de vie et un confort aux occupants » (EnergieSprong France, s. d.)

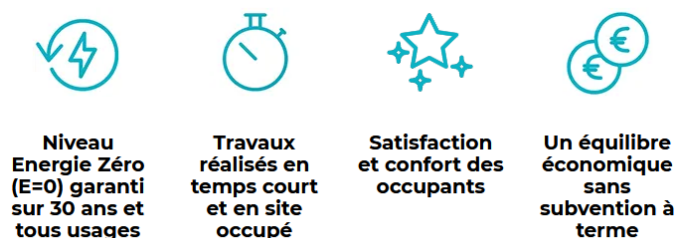


Figure 2-2 : Exigences de la démarche EnergieSprong (EnergieSprong France, s. d.)

Le CERDD (2021) précise que les principes pour parvenir à atteindre ces résultats sont une architecture simple, une uniformisation des techniques, matériaux et systèmes (par exemple, par la préfabrication des façades isolées en usine), des systèmes de chauffage et de ventilation intelligents et le recours aux énergies renouvelables.

La méthode repose également sur le principe de massification de la rénovation qui permet de réduire les coûts d'investissement (de 145.000€ à 70.000€). En démontrant qu'il est possible de rénover sans recourir à des subventions publiques, EnergieSprong a permis de dynamiser le marché de la rénovation énergétique aux Pays-Bas. Depuis 2012, plus de 5.000 logements sociaux ont été rénovés de cette manière et bien d'autres projets sont prévus dans les années à venir. En 2015, séduit par le concept, la commission européenne souhaite promouvoir EnergieSprong dans d'autres pays et l'intègre donc dans des programmes comme Interreg North-West Europe et « Horizon 2020 ». (CERDD, 2021)

La seconde initiative, cette-fois-ci développée à l'échelle européenne, est la mise en place de One-Stop-Shop (« guichet unique »). Encouragé par la Commission européenne à travers l'initiative « Smart financing for smart buildings » et la Directive de la performance énergétique (EPBD) 2018/844/EU, One-Stop-Shop (OSS) consiste à établir un point unique de contact pour la rénovation énergétique. Il s'agit à la fois d'un outil de transparence et d'accessibilité à la rénovation pour les propriétaires et un modèle financier innovant pour les fournisseurs. (Pardalis et al., 2021)

Même si plus d'une vingtaine de OSS ponctuels, ainsi que plusieurs projets à plus grande échelle, ont déjà été mis en place, la connaissance du concept est encore imparfaite. Les OSS ont tout de même un potentiel d'efficacité certains puisque, selon Boza-Kiss et Bertoldi (2018), ils :

- interviennent localement ;
- accélèrent la rénovation des bâtiments en informant et accompagnant, du début à la fin, les propriétaires à travers les démarches de financement de leur projet de rénovation énergétique ;
- peuvent motiver les propriétaires qui ne se sont pas encore décidés à se lancer dans un projet ;
- facilitent l'accès aux financements et offrent parfois de meilleur taux...

Certification passive adaptée

Une autre manière d'encourager la rénovation énergétique des logements a été l'adaptation à la rénovation des labels de certification de haute efficacité énergétique qui existaient pour la construction neuve. Avec des critères plus souples, ces labels sont devenus plus accessibles aux bâtiments existants et permettent de valoriser des projets de rénovation de haut niveau qui n'auraient pas pu satisfaire les critères pour le neuf.

Le pays précurseur de la certification passive est l'Allemagne, avec les labels Passivhaus, délivré par la Passive Haus Institute. En plus de ceux destinés aux nouvelles constructions, il existe les labels « EnerPHit » (Classique, Plus et Premium selon le niveau) qui sont adressés aux bâtiments existants et rénovés. (Passive House

Intitute, 2016) Ces labels sont également appliqués en France, selon les mêmes critères, par l'organisme La Maison Passive. (La Maison Passive, 2019)

En Belgique (Wallonie et Bruxelles), c'est l'asbl Maison Passive (pmp), qui s'occupe, selon ses propres critères, de la certification passive. Fin 2019, parmi les nouveaux labels de certification créés, se trouve le label « Passif rénovation » dont les critères sont repris à la Figure 2-3. (Maison Passive pmp, 2019)

LABELS	BNE (kWh/ m ² .an)	Étanchéité (vol/h)	Surchauffe (%)	Consommation d'EPR ¹ (kWh/m ² _{SRE} .an)	Production d'EPR ² (kWh/m ² _{sol} .an)
	≤ 15	≤ 0,6	≤ 5	≤ 60	-
	≤ 15	≤ 0,6	≤ 5	≤ 45	≥ 60
	≤ 15	≤ 0,6	≤ 5	≤ 30	≥ 120
	≤ 25	≤ 1	≤ 5	≤ 80	-

PASSIF RÉNOVATION

- Critère de consommation en EPR : 80 kWh/m²_{SRE}.an
- Critère de production en EPR : aucun

Pour la rénovation, le critère de consommation en EPR est fixé à 80 kWh/m²_{SRE}.an. Aucune production d'énergie renouvelable n'est exigée. Cependant, et comme pour tous les autres labels, celle-ci peut permettre d'atteindre plus facilement le label si la réduction de la consommation en EPR s'avère être inatteignable pour raisons techniques ou économiques. Ainsi, une consommation en EPR de 95 kWh/m².an peut être acceptée si un minimum d'EPR est produit à l'échelle du bâtiment.

1. Énergie domestique incluse
2. Le critère de la consommation d'EPR par m² se réfère à la surface de référence énergétique du projet concerné, tandis que le critère de production d'EPR par m² s'exprime par rapport à son emprise au sol.

Figure 2-3 : Labels et critères de certification pour le passif en Wallonie et à Bruxelles (Maison Passive pmp, 2019)

Deux autres labels européens importants permettent encore de certifier les rénovations à basse consommation d'énergie. Le premier est « BBC Effinergie Rénovation », un label français conçu par Effinergie mais délivré par des certificateurs accrédités. (Effinergie, 2021). Le deuxième label est « Minergie » (base, -P ou -A selon le niveau), originaire de Suisse mais également appliqué en France. (Minergie, 2020)

2.1.3 Stratégies de rénovation en Belgique

En Belgique, ce sont les régions qui sont responsables en matière d'énergie. Chacune des trois régions possède donc sa propre stratégie d'encouragement de la rénovation énergétique : *Walloreno* pour la Wallonie, *Renolution* pour Bruxelles-Capitale et *Ik BENOveer* pour la Flandre.

Walloreno (Wallonie)

Walloreno est la campagne de communication et de sensibilisation de la Stratégie wallonne de rénovation. Son objectif est de « promouvoir la rénovation des bâtiments, pour améliorer les performances énergétiques du parc immobilier et atteindre le label PEB A [max. 85 kWh/m².an] en moyenne d'ici 2050 ». (Walloreno, 2021b)

Et la tâche est de taille. En Wallonie, le label moyen du parc de logements (presque 1.600.000) est le label F. Pour atteindre l'objectif fixé, il faudrait donc rénover 48.000 logements par an, soit 130 par jour, pendant 30 ans. (Maison Passive pmp, 2021) A cette fin, la Région wallonne met à disposition des candidats rénovateurs de nombreux outils d'accompagnement, qui sont repris sur le site de la campagne Walloreno :

- les guichets Énergie Wallonie ;
- le Quicksan ;

- l’audit Logement (et certificat PEB) ;
- la prime Habitation ;
- le prêt à taux zéro ;
- le guide pratique « Rénover pour consommer moins d’énergie ».

Ik BENOveer (Flandre)

Le programme Ik BENOveer³ est issu du Pacte de rénovation conclu entre le gouvernement flamand et plusieurs acteurs du secteur de la construction. Le but ultime est de « rendre chaque maison ou appartement aussi économe en énergie d’ici 2050 qu’une maison énergétiquement performante aujourd’hui ». (Vlaanderen, 2020)

Le parc immobilier flamand comprenant 2.500.000 logements à rénover, ce sont 100.000 logements dont il faudrait se charger chaque année pour remplir l’objectif visé avant l’échéance. (Maison Passive pmp, 2021) Ainsi, selon la vision de la campagne, la rénovation doit être « ambitieuse » (aller plus loin que ce que la réglementation sur la performance énergétique exige aujourd’hui) et « minutieuse » (bien planifier les travaux et prendre en compte les conseils d’experts). La Région flamande a donc mis en place un portail numérique qui équivaut à un dossier médical du logement et rassemble certificat PEB, feuille de route, suivi des travaux... (Vlaanderen, 2020)

Renolution (Bruxelles-Capitale)

Renolution, nom donné à la Stratégie Rénovation de la Région de Bruxelles-Capitale, vise à atteindre « un niveau moyen de performance énergétique de 100kWh/m²/an [label C+, équivalent à B en Wallonie] pour l’ensemble des logements bruxellois en 2050 ». (Bruxelles Environnement, 2020)

Pour rénover les 550.000 logements concernés, 5% des logements occupés par leurs propriétaires et 2,6% des logements en location devraient passer par la case rénovation. (Maison Passive pmp, 2021) Les axes d’intervention prioritaires mis en avant sur la page de Renolution pour y arriver sont :

- la promotion du certificat PEB (rôle central) ;
- la mise en œuvre d’une dynamique collective avec différents acteurs de la construction ;
- l’accompagnement des propriétaires (aides financières, prêts à taux faible, démarches administratives simplifiées...) ;
- le renforcement des exigences pour le secteur tertiaire ;
- l’inscription dans une logique circulaire.

Comparaison

Les objectifs visés par les trois régions pour l’horizon 2050 sont finalement fort similaires. Si par la compacité de son parc de logement (majorité d’appartements), Bruxelles profite d’un label PEB initial meilleur que les deux autres régions, cette typologie majoritaire est également un frein puisque plus compliquée à rénover que

³ Issu de la contraction de « beter renoveren » qui signifie « mieux rénover »

de l'habitat individuel. La Région wallonne et la Région flamande ont par contre l'avantage sur Bruxelles au niveau des outils concrètement mis en œuvre pour promouvoir et accompagner les projets de rénovation. (Maison Passive pmp, 2021)

2.1.4 Outils mis à disposition en Wallonie

La campagne Walloreno permet de mettre en évidence les principaux outils mis à la disposition des citoyens wallons qui désirent se lancer dans des travaux de rénovation énergétique de leur habitation. Ceux-ci sont présentés et détaillés dans cette section afin de perfectionner la connaissance du contexte régional dans lequel s'inscrit ce travail de recherche. A savoir que, de nouveaux outils ont été développés récemment : le passeport bâtiment, la feuille de route de rénovation et le guichet énergie unique.

Guichets Énergie

Les Guichets Énergie Wallonie sont des espaces d'accueil, d'information et d'accompagnement des citoyens pour tout ce qui concerne l'énergie au sein de leur logement. Il existe actuellement seize guichets, répartis sur le territoire régional. Toutes les prestations, assurées par des professionnels du milieu, sont impartiales, personnalisées et totalement gratuites. Propriétaires ou locataires peuvent ainsi venir chercher des conseils techniques ou administratifs quant à leurs projets de construction ou rénovation, ou simplement leurs habitudes au quotidien, afin d'améliorer la performance énergétique de leur habitation. Ils peuvent également obtenir des informations sur les réglementations en vigueur en Wallonie et les aides à leur disposition. (SPW Énergie, 2021a)

Quickscan

Quickscan⁴ est un outil en ligne d'auto-évaluation rapide et facile des performances énergétiques de son habitation (uniquement les maisons unifamiliales pour l'instant). Il conseille également les travaux à réaliser pour réduire la consommation d'énergie et améliorer le confort. Il ne s'agit évidemment que d'une évaluation simplifiée et indicative qui ne remplace par une vraie certification PEB. (SPW Énergie, 2016b)

Audit logement

L'audit logement est une analyse de la performance énergétique des différents postes d'un logement existant (maison unifamiliale, appartement, immeuble...) et des aspects de salubrité, de santé et de sécurité. Il doit être réalisé par un auditeur agréé par la Wallonie. Il permet « de connaître les points faibles du logement et d'identifier les travaux à réaliser prioritairement afin d'améliorer le confort et la santé des habitants et de diminuer les consommations d'énergie ». (SPW Énergie, 2019) Ces travaux sont hiérarchisés, regroupés en bouquets et chiffrés (investissement initial, primes, économies d'énergie...). Les résultats sont présentés dans une brochure claire et détaillée.

⁴ www.monquickscan.be

L'audit logement ne doit pas être confondu avec le certificat PEB. Si le premier est réalisé sur base volontaire, le deuxième est obligatoire lors de la vente ou location d'un logement. Pour une habitation unifamiliale, un certificat PEB valable pour une période de 10 ans est fourni en même temps que l'audit. La certification PEB est davantage détaillée à la section 2.2.1. (SPW Énergie, 2019)

Primes et prêts à taux réduit

Depuis juin 2019, trois types d'aide financière sont proposées aux particuliers qui souhaitent rénover : les primes Habitation, le prêt à taux réduit⁵ sans primes (Rénoprêt) et le prêt à taux réduit avec primes (Rénopack). La condition principale pour pouvoir prétendre à ces aides est d'être propriétaire d'un logement situé en Wallonie et construit il y a plus de 15 ans (variations possibles). (SPW, 2021a)

Les primes Habitation sont des aides financières octroyées pour la réalisation de certains travaux. Le montant dépend de la composition du ménage, de la classe de revenus, des travaux à réaliser et de leur impact sur l'amélioration de la performance énergétique du logement. Toutefois, la prime ne peut dépasser 70% du montant total des travaux concernés. (SPW, 2021a)

Le prêt à taux réduit est un prêt à tempérament à un taux débiteur de 0% destiné à financer des travaux de rénovation d'un logement (économies d'énergie, salubrité, sécurité, adaptation au handicap). A l'heure actuelle, le montant accordé peut s'élever de 1.000€ à maximum 60.000€ et la durée du crédit, fixée par l'organisme prêteur (Société wallonne du Crédit Social ou Fonds du logement de Wallonie), est de maximum 30 ans. Les travaux finançables de cette façon sont les travaux de rénovation, d'adaptation, d'économie d'énergie, de salubrité et de sécurité. (SWCS, 2019)

Pour bénéficier de ces aides financières, il est impératif, sauf exceptions, de faire réaliser avant le début des travaux de rénovation un audit logement par un auditeur agréé par la Wallonie. Bien que cet audit soit payant, une prime, d'un montant compris entre 110€ et 660€, peut être octroyée par la Wallonie et ce pour tous les ménages wallons sans condition de revenus. (SPW, 2021a)

Plateformes locales de rénovation énergétique

Fin 2018, la Région wallonne lance un appel à candidature pour un projet pilote : la mise en place de plateformes locales de rénovation énergétique. Après avoir identifié certains des obstacles responsables du faible taux de rénovation en Wallonie (budget à investir, démarches administratives, logistique des travaux...), le développement de telles plateformes est envisagé comme une réponse potentielle. Parmi les entités wallonnes ayant candidaté, les plus prometteuses sont sélectionnées pour recevoir un subventionnement d'environ 30.000€ répartis sur deux ans. Le rôle principal attribué à ces plateformes est d'« accompagner une sélection de candidats rénovateurs lors de l'ensemble des étapes de leur projet (de la phase d'information et d'élaboration à la phase de réalisation des travaux) ». (SPW Énergie, 2018)

⁵ Ou « prêt à taux zéro ».

Toutes les plateformes ayant émergé suite à ce projet n'ont pas subsisté jusqu'à aujourd'hui. La répartition actuelle des plateformes en Wallonie est d'ailleurs plutôt inégale : 1 en province de Liège (Liège-Énergie), 3 dans le Hainaut (le CPAS de Charleroi, la ville de Soignies et celle de La Louvière), 2 en province du Luxembourg (la Province et le CPAS de Marche-en-Famenne) et aucune en province de Namur et dans le Brabant wallon. Dans ces deux dernières provinces, ce sont d'autres guichets qui remplissent la fonction d'accompagnement des projets de rénovation énergétique. (*Entrevue 1 avec Liège-Énergie, 28 septembre 2021*)

Les subsides octroyés par le projet pilote ayant cessé en mars 2021, un nouvel appel à projet est lancé en juillet 2021 pour subventionner de nouvelles plateformes ou soutenir financièrement les plateformes existantes dès 2022 et pour trois années. Les résultats sont tombés à la fin du mois de décembre. Cette fois, les logements à cibler sont ceux à « très faible performance énergétique [classes F et G du certificat PEB], avec une attention particulière sur les ménages à faibles revenus ». L'objectif est d'améliorer la performance énergétique de ces logements jusqu'à un niveau correspondant à un label A, que ce soit en une ou plusieurs phases de travaux. (SPW Énergie, 2021c)

2.2 CONCEPTS CLÉS

2.2.1 Performance énergétique

Principe

La performance énergétique d'un bâtiment peut être définie par « la quantité d'énergie calculée ou mesurée nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques liés à une utilisation normale du bâtiment, ce qui inclut entre autres l'énergie utilisée pour le chauffage, le système de refroidissement, la ventilation, la production d'eau chaude et l'éclairage. » (SPW Énergie, 2020a)

Afin de respecter les engagements de l'Europe lors du Protocole de Kyoto, le Parlement et l'Union européenne adoptent le 16 décembre 2002 la Directive européenne (DE) 2002/91/CE sur la Performance énergétique des bâtiments (peb). Le 19 mai 2010, une refonte de cette directive crée la DE 2010/31/UE, qui comporte de nouvelles obligations et des exigences renforcées. Cette directive est elle-même révisée le 30 mai 2018 et donne la DE 2018/844/UE, introduisant de nouvelles exigences, notamment en matière d'électromobilité. (SPW Énergie, 2020a)

La Directive sur le Performance énergétique des bâtiments concerne tous les bâtiments chauffés (secteur résidentiel ou tertiaire), et repose sur 4 principes :

- une méthodologie commune de calcul ;
- des exigences minimales pour les bâtiments neufs et existants soumis à une rénovation importante ;
- un système de certification pour les bâtiments neufs et existants ;
- une inspection régulière des systèmes de chauffage et de climatisation.

Tous les États membres de l'Union Européenne sont tenus de transposer en droit interne l'ensemble de la Directive. En Belgique, ce sont les autorités régionales qui sont responsables en matière d'énergie. Chaque région possède donc sa version de la directive, sa réglementation régionale. (SPW Énergie, 2020a)

En Wallonie, la transposition de la DE de 2010 en droit wallon a été réalisée par l'adoption par le Parlement wallon du Décret régional (DR) du 28 novembre 2013 et par le Gouvernement wallon d'un arrêté d'application, le 15 mai 2014. Le décret a été révisé le 17 décembre 2020 pour transposer la DE de 2018. (SPW Énergie, 2021b)

La réglementation wallonne sur la peb fixe une méthode de calcul, les exigences minimales à respecter, les modalités d'agrément ainsi que les procédures administratives. Elle s'applique à « l'ensemble des bâtiments (sauf exceptions explicitement visées par la réglementation) pour tous les travaux de construction, de reconstruction et de transformation nécessitant l'obtention d'un permis d'urbanisme ». (SPW Énergie, 2021b)

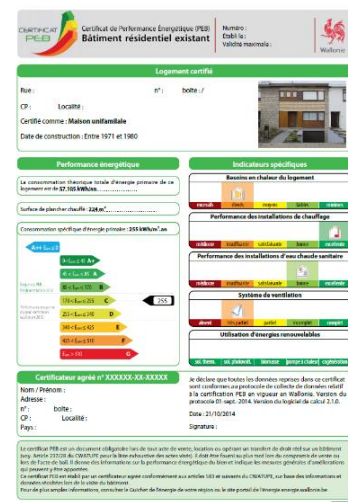
Évaluation

La méthode conventionnelle et unique d'évaluation de la peb en Wallonie est la méthode de calcul PEB. Elle est basée sur des conditions climatiques, d'occupation et d'utilisation standardisées. Les consommations qui y sont évaluées sont donc des valeurs théoriques et non réelles. L'outil utilisé est le logiciel PEB et l'évaluation repose sur plusieurs facteurs influençant la consommation d'énergie :

- besoins nets (pertes par transmission, ventilation et infiltration, gains solaires et internes, inertie thermique) ;
- besoins en eau chaude sanitaire (pour le résidentiel) ;
- pertes dues aux systèmes de chauffage ;
- besoins de refroidissement ;
- consommations des auxiliaires ;
- énergies renouvelables (solaire photovoltaïque ou thermique).

Pour le résidentiel, la peb est exprimée à travers deux indicateurs principaux : le niveau E_w et la consommation spécifique E_{spec} , rapport entre consommation totale et surface de plancher chauffée (en KWh d'énergie primaire). Des indicateurs complémentaires sont également évalués : le niveau K de l'enveloppe et la valeur U des parois. (SPW Énergie, 2021d)

Les résultats obtenus sont répertoriés dans le certificat PEB du bâtiment. Il s'agit d'un document « carte d'identité », qui ne peut être délivré que par un certificateur agréé. La peb y est exprimée à l'aide de plusieurs indicateurs (classe énergétique, consommation d'énergie primaire, énergie renouvelable, CO₂ ...). Le certificat donne aussi quelques recommandations pour améliorer la peb. Pour les bâtiments résidentiels



existants (construits avant 2010), la possession du document est obligatoire en cas de mise en vente ou location. (SPW Énergie, s. d.)

Figure 2-4 : Exemple de certificat PEB (SPW Énergie, s. d.)

Les rénovations importantes concernent les « bâtiments faisant l'objet de travaux de rénovation importants, c'est-à-dire : lorsqu'ils font l'objet de travaux portant sur au moins 1/4 de leur enveloppe. » (SPW Énergie, 2017) Les exigences qu'elles se doivent de respecter sont reprises dans la Figure 2-5.

NATURE DES TRAVAUX SOUMIS À PERMIS				Valeurs U	Niveau K	Niveau E _{tr}	Consommation spécifique	Ventilation	Surchauffe
				U	K	E _{tr}	E _{act}	V	S
Procédure AVEC responsable PEB	Bâtiment neuf ou assimilé	PER	Maisons unifamiliales Appartements			45	85 kWh/m ² a n	Annexe C2	< 6.500 kWh
		PEN	Bureaux Services Enseignement Hôpitaux HORECA Commerces Hébergements collectifs ...	≤ U _{max} (1)	≤ K35 + nouveaux constructifs	90/45 (2)		Annexe C3	
	I	Industriel		≤ K55 + nouveaux constructifs					
	Rénovation importante (4)			Uniquement éléments modifiés et neufs					(3)
Procédure SANS responsable PEB Déclaration PEB simplifiée	Rénovation simple, y compris Changement d'affectation chauffé > chauffé (4)			≤ U _{max} (1) des éléments modifiés et neufs				(3)	
	Changement d'affectation non chauffé > chauffé (4)				≤ K65 + nouveaux constructifs			Annexe C2 ou C3	

Élément de construction	U _{max} [W/m ² K]
Parois délimitant le volume protégé	
Toitures et plafonds	0.24
Murs (1)	0.24
Planchers (1)	0.24
Portes et portes de garage	2.00
Fenêtres : - Ensemble châssis et vitrage - Vitrage uniquement	1.50 1.10
Murs-rideaux : - Ensemble châssis et vitrage - Vitrage uniquement	2.00 1.10
Parois transparentes/translucides autres que le verre : - Ensemble châssis et partie transparente - Partie transparente uniquement (ex : coupole de toit en polycarbonate,...)	2.00 1.40
Briques de verre	2.00
Parois entre 2 volumes protégés situés sur des parcelles adjacentes (2)	1.00
Parois opaques à l'intérieur du volume protégé ou adjacentes à un volume protégé sur la même parcelle (3)	1.00

Figure 2-5 : Exigences PEB depuis le 11 mars 2021 (SPW Énergie, 2017)

Focus sur la consommation d'énergie

L'indicateur de performance énergétique auquel s'intéresse principalement cette étude est la consommation d'énergie. Elle s'exprime en kilowattheure (kWh). Par définition, 1 kWh équivaut à la puissance nécessaire pour le fonctionnement d'un appareil de 1.000 (k) watts (W) pendant une heure (h). (Charlot-Valdiou & Outrequin, 2018)

L'énergie consommée liée à un bâtiment peut être exprimée sous plusieurs formes, qu'il est important de ne pas confondre :

- Besoins en énergie nets : « énergie que les systèmes de chauffage et/ou de refroidissement doivent fournir à l'ambiance pour maintenir une température intérieure définie (température de consigne) afin de compenser les déperditions thermiques en hiver et les surchauffes en été » ; (Energie Plus Le Site, 2011a)
- Énergie finale : « consommation énergétique globale pour le chauffage et le refroidissement qui sera facturée à l'utilisateur (pertes liées au

fonctionnement des différentes installations comprises) » ; (Energie Plus Le Site, 2011c)

- Énergie primaire : « première forme d'énergie directement disponible dans la nature avant toute transformation : bois, charbon, gaz naturel, pétrole, vent, rayonnement solaire, énergie hydraulique, géothermique, etc. Elle permet de mettre les différentes sources d'énergie sur le même pied d'égalité, en prenant en compte toutes les transformations nécessaires avant livraison au consommateur final ». (Energie Plus Le Site, 2011b)

Il n'existe pas d'exigence de consommation pour les projets de rénovation mais la Stratégie wallonne de rénovation vise pour 2050 un label A en moyenne pour le stock de logement, ce qui équivaut à une consommation spécifique d'énergie primaire $E_{spec} < 85 \text{ kWh/m}^2.\text{an}$.

2.2.2 Impacts environnementaux

Principe

Les matériaux, les éléments de construction et les bâtiments ont un impact sur l'environnement. Si les composants doivent avant tout remplir leur fonction et respecter les exigences imposées, il devient indispensable de veiller également aux impacts environnementaux, voire sanitaires, potentiels, qui peuvent être très problématiques. La Figure 2-6 reprend les types d'impact environnementaux principaux ainsi que les agents provocateurs.

Impact environnemental	Inventaire (ex.)	unité
Changement climatique	Gaz à effet de serre: CO ₂ , CH ₄ ,...	kg CO ₂ equiv
Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	CFC, HCFC,...	kg CFC equiv
Acidification atmosphérique	NO _x , HCl, HF, SO ₂	kg SO ₂ equiv
Eutrophisation;	Composés phosphorés, nitrés (engrais)	kg PO ₄ equiv
Formation d'ozone troposphérique (smog)	Hydrocarbures	kg equiv. Ethylène
Toxicité humaine	Métaux lourds, dioxines,...	Kg 1,4 DB eq

Figure 2-6 : Types d'impact environnementaux et agents provocateurs (Wastiels, 2012)

Ces impacts peuvent survenir à différentes phases du cycle de vie :

- Production : ressources, transport, fabrication ;
- Construction : transport, installation ;
- Utilisation : maintenance, remplacement, consommation d'énergie ;
- Fin de vie : démolition, transport et traitement des déchets.

Il est important de s'intéresser aux impacts environnementaux tout au long du cycle de vie car l'influence des phases d'utilisation et de fin de vie d'un bâtiment et/ou de ses composants est significative, voire prépondérante. Or, la prise de conscience de l'importance de la préservation de l'environnement pousse à vouloir

inscrire les projets de construction dans une démarche plus durable. (Wastiels, 2012)

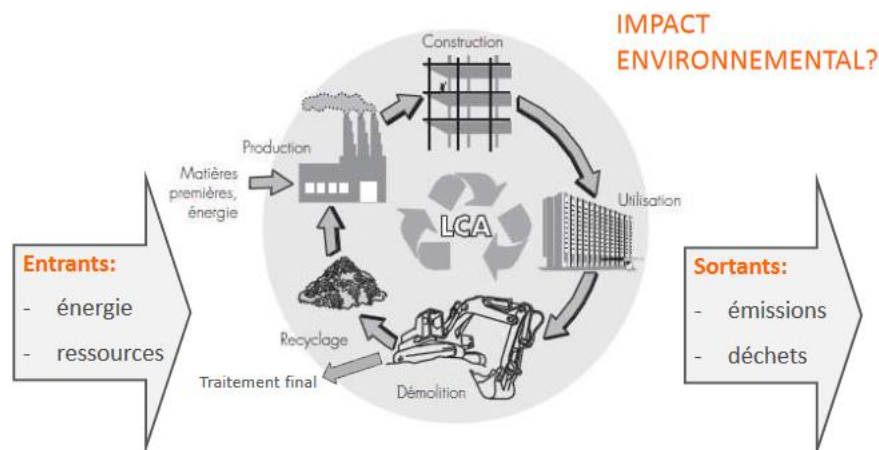


Figure 2-7 : Schéma conceptuel des impacts environnementaux en construction (Wastiels, 2012)

Évaluation

Puisqu'il n'existe pas encore de réglementation à ce niveau, les méthodes et outils d'évaluation des impacts environnementaux sont nombreux : labels, déclarations environnementales, checklists, ACV...

La méthode la plus connue est l'analyse du cycle de vie ou ACV (Life cycle assessment ou LCA en anglais). Il s'agit d'une « méthode d'évaluation multicritère qui quantifie les impacts environnementaux potentiels d'un produit en adoptant une vision globale de son cycle de vie ». (Guide Bâtiment Durable, 2013)

L'ACV est de plus en plus utilisée, que ce soit par les chercheurs, les industries, les institutions, les organismes environnementaux, etc. pour prendre en considération les problématiques environnementales associées aux matériaux, composants et systèmes d'un bâtiment, voire le bâtiment dans sa globalité. C'est un outil qui peut aider à la prise de décision en permettant de comparer deux éléments concurrents, deux phases de cycle de vie d'un même élément, un élément et ses alternatives ou un élément à une référence. (Reiter, 2010)

L'ACV est mondialement répandue et est régie par la famille de norme ISO 14000 - Management environnemental, en particulier les normes :

- ISO 14040 :2006 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre (ISO, 2006b)
- ISO 14044:2006 : Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices (ISO, 2006c)

Pour les bâtiments, la norme à suivre est NBN EN 15978 :2012 : Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul (NBN, 2012)

À nouveaux, de nombreux outils de calcul sont disponibles : certains très simples, voire monocritères, d'autres très complexes et détaillés. Un de ces outils,

belge et basé sur la norme NBN, s'appelle TOTEM (Tool to Optimise the Total Environmental Impact of Materials) et évalue les impacts environnementaux de projets de construction ou de rénovation selon 17 indicateurs. Il est disponible gratuitement en ligne (www.totem-building.be) et accessible à tout professionnel du secteur de la construction intéressé. (Wastiels, 2018)

Aujourd'hui, aucune exigence au niveau des impacts environnementaux n'est imposée aux bâtiments, que ce soit en construction ou rénovation.

Focus sur les émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ constituent l'impact environnemental le plus couramment évalué dans les projets de construction ou de rénovation. En tant que principal gaz à effet de serre (GES), le carbone contribue au réchauffement climatique et requiert donc une attention particulière. Il est évalué en kg CO₂ équiv.

Une partie des émissions de CO₂ d'un bâtiment est liée à la consommation d'énergie opérationnelle (pendant l'utilisation du bâtiment) tandis qu'une autre partie est liée à la fabrication, au transport et à la mise en œuvre des matériaux et équipements. (Energie Plus Le Site, 2021)

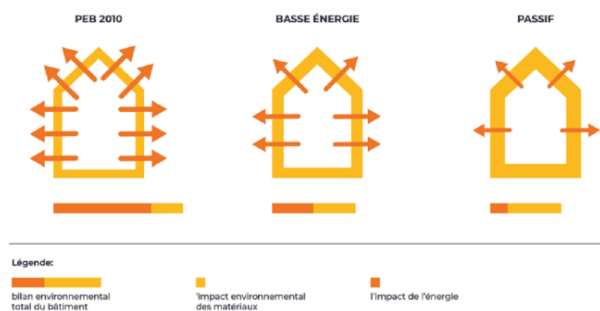


Figure 2-8 : Schéma des parts de CO₂ liées à un bâtiment (Depover, 2021)

Les mesures de réduction d'émission de GES identifiées par Climact sont :

- l'amélioration de l'enveloppe du bâtiment ;
- le changement de combustible et système de chauffage, pour des vecteurs énergétiques qui émettent moins, voire pas, de carbone (électricité renouvelable, chauffage urbain, biomasse durable...);
- le remplacement des appareils ménagers par des appareils plus efficaces ;
- la consommation d'électricité renouvelable ;
- l'utilisation de matériaux de construction décarbonés (naturels, recyclés...).

Un projet de rénovation énergétique permet donc de toucher à l'ensemble des points et a un rôle important à jouer dans la réduction des émissions de CO₂. (Energie Plus Le Site, 2021)

Il n'existe pourtant pas encore d'exigence, pénalisation ou label en Wallonie relatif à l'empreinte carbone d'un bâtiment. La valeur des émissions de CO₂ évaluées lors de la certification PEB est tout de même indiquée, à titre informatif, sur le certificat.

2.2.3 Confort

Principe

Le confort, lié au bien-être et à la santé des occupants du bâtiment, ne doit pas être négligé dans un projet de rénovation. Surtout, la performance énergétique ne doit pas être assurée au détriment du confort des habitants.

La notion de confort au sein d'un espace renferme plusieurs aspects :

- confort thermique (températures et humidité) ;
- confort visuel (éclairage naturel et artificiel) ;
- qualité d'air intérieur ;
- confort acoustique.

Évaluation

Le confort est un paramètre qui n'est pas facile à évaluer, surtout pour les températures. Il s'agit, en effet d'une notion partiellement subjective, ressentie différemment par les occupants, et qui est influencée par beaucoup de variables. Il est tout de même possible de définir des plages de critères objectifs, où le confort étudié satisferait un maximum de personnes.

La Norme NBN EN 15251 :2007 - Critères d'ambiance intérieure, qui est applicable aux « maisons individuelles, immeubles d'habitation, bureaux, bâtiments d'enseignement, hôpitaux, hôtels et restaurants, installations sportives... » établit des lignes de conduite par l'évaluation des différents types de confort. (Energie Plus Le Site, 2014)

Focus sur le confort thermique

Type de confort le plus couramment évalué dans les bâtiments, le niveau de confort thermique est généralement obtenu à partir de la traduction de facteurs sensibles en indices de sensation. Il existe deux indices empiriques de prévision de la sensation thermique et du degré d'inconfort, qui sont internationalement reconnus et régulés par la norme EN ISO 7730 :2005 (ISO, 2005a) :

- PMV (Predicted Mean Vote) = vote moyen prévisible, d'une valeur entre -3 (froid) et 3 (chaud)
- PPD (Predicted percentage of dissatisfied) = pourcentage prévisible de personnes non satisfaites

Ces indicateurs peuvent être traduits en objectifs de température opérative pour des conditions d'activité, d'habillement, d'humidité et de vitesse d'air type, afin de définir des conditions d'ambiance thermique acceptables pour le confort.

Type de bâtiment ou d'espace	Catégorie	Température opérative °C	
		Minimum pour le chauffage (saison hivernale), ~ 1,0 clo	Maximum pour le rafraîchissement (saison estivale), ~ 0,5 clo
Bâtiments d'habitation : pièces de séjour (chambres, séjour, cuisine, etc.) Sédentaire ~ 1,2 met	I	21	25,5
	II	20	26
	III	18	27

Figure 2-9 : Exemples de températures intérieures opératives recommandées (Energie Plus Le Site, 2014)

Il existe alors quatre techniques d'évaluation du confort thermique :

- par indicateurs simples ;
- par critères horaires (nombre d'heures effectif ou % de temps pendant lequel le critère est respecté) ;
- par critère des degrés-heures (évalue le dépassement des limites de température hautes ou basses en saison chaude ou froide pour pondérer la durée du dépassement de la plage cible par l'ampleur du dépassement, chaque heure de dépassement étant multipliée par l'écart de dépassement en degré) ;
- par critère de confort thermique global (PMV pondéré, idem mais heures comptabilisées pour dépassement des plages de confort exprimée en PMV).

Même si les rénovations ne sont pas soumises aux exigences PEB concernant la surchauffe, il est intéressant de connaître les deux valeurs qui existent pour les constructions neuves :

1. Limite supérieure = 6.500Kh (à ne pas dépasser pour une habitation neuve et possibilité de devoir installer un système de refroidissement actif)
2. Limite inférieure = 1.000Kh (pas de système de refroidissement actif nécessaire)

L'indice de surchauffe d'un bâtiment ne dépend pas seulement de la température intérieure mais aussi d'autres facteurs liés au bâtiment, comme l'inertie thermique ou le rapport entre gains et pertes. (SPW Énergie, 2021d)

2.2.4 Coûts

Principe

Les coûts d'un bâtiment peuvent être perçus à différentes étapes de son existence (investissement, utilisation, fin de vie), assumés par différents acteurs (investisseur, usager, collectivité) et de différentes natures (coûts de construction, environnementaux, sociaux...). (Guide Bâtiment Durable, 2018)

L'études des coûts d'un projet de construction ou de rénovation est donc une opération plus complexe qu'il n'y parait et qui se doit de prendre en compte une dimension économique (équilibre entre investissements et économies d'énergie, avec prise en compte des coûts de maintenance et de remplacement des équipements) mais également une dimension environnementale (réduction des émissions de GES, surtout le CO₂) et sociale. (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2018)

Évaluation

Le concept d'étudier les coûts d'un projet sur l'ensemble de la durée de vie du bâtiment est appelé analyse du coût sur le cycle de vie (ACCV). Comme l'ACV, il s'agit d'un outil d'aide à la décision qui tient compte de plusieurs paramètres et qui est surtout intéressante par approche comparative de plusieurs variantes d'un projet. (Guide Bâtiment Durable, 2018)

Puisque la procédure n'est pas non plus réglementée, il n'existe pas de méthode unique. Différentes formes de coûts, par gradation de complexité, peuvent d'ailleurs être définies :

- coût initial = coût d'investissement (conception et construction), comme il est courant de le faire dans la budgétisation d'un projet ;
- coût global direct = CI + coûts différés sur une période donnée ou sur le cycle de vie (utilisation et fin de vie), qui sont loin d'être négligeables ;
- coût global élargi = CGD + coûts indirects (associés aux aspects environnementaux et sociaux, dont les externalités liées aux émissions de CO₂) ;
- coût global partagé = CGD ou CGE avec répartition des coûts et bénéfices sur les différents acteurs du projet (maitre d'ouvrage, maitre d'œuvre, usager, partenaires financiers, collectivité, société...)

L'évaluation peut être quantitative, s'il y a volonté de chiffrer le projet pour comparer ou justifier un choix, ou qualitative, s'il y a volonté de prendre en compte des dimensions non chiffrables (sociales, environnementales, sociétales...) (Guide Bâtiment Durable, 2018)

La norme à suivre dans le cas d'une ACV pour le calcul d'un coût global est la norme ISO 15686-5 :2017 - Bâtiments et biens immobiliers construits - Prévission de la durée de vie - Partie 5 : Approche en coût global. (ISO, 2017)

Deux types d'approche, détaillées par Charlot-Valdieu et Outrequin (2018), peuvent être considérés pour le calcul de la rentabilité d'un projet. La première est l'approche financière ou microéconomique. Elle concerne les acteurs privés et recherche les meilleures solutions du point de vue des maitres d'ouvrage (particuliers ou gestionnaires de parc immobilier), surtout au niveau de la rentabilité des investissements. Le bilan financier est égal aux investissements effectués (retranchés des potentielles subventions et primes, auxquels s'ajoutent les intérêts du crédit éventuel), plus les coûts d'exploitation, plus les coûts de maintenance, plus les coûts de renouvellement. Il s'agit donc plutôt d'un coût global direct. La deuxième est l'approche sociétale ou macroéconomique. Elle concerne la collectivité et recherche les meilleures solutions pour l'intérêt général (par exemple, la réduction des consommations et des émissions de GES), avec prise en compte de valeurs non marchandes. Il s'agit donc plutôt d'un coût global élargi.

L'ACV est donc une procédure qui peut être complexe à appréhender, qui demande beaucoup d'infos tôt dans le projet, parfois incertaines, et qui tient compte de données variables. Il est donc nécessaire de poser de nombreuses d'hypothèses, qui doivent être sécuritaires mais pas trop pénalisantes. (Guide Bâtiment Durable, 2018)

Les principales hypothèses à décider avec de se lancer dans une ACV sont :

- la durée de l'étude ;
- les coûts à prendre en compte ;
- la durée de vie des composants du projet ;
- le taux d'actualisation ;

- la prime de risque ;
- l'inflation.

La durée d'étude, paramètre très important, correspond à la « période de temps sur laquelle l'analyse en coût global est réalisée ». (Guide Bâtiment Durable, 2018) Pour un projet privé familial, la durée recommandée est la durée de l'emprunt ayant été contracté, soit 20 à 30 ans. (Guide Bâtiment Durable, 2018)

Aucune réglementation n'impose d'exigences à respecter mais l'ACCV peut être valorisée par une certification *BREEAM* 2013 - MAN 05 : Life cycle cost and service life. (Guide Bâtiment Durable, 2018)

Focus sur les types de coûts

Au final, les coûts qui sont à prendre en compte pour l'évaluation du CGD sont les coûts de/d' :

- investissement (conception, accompagnement, foncier, matériaux et équipements, construction, frais annexes...);
- fonctionnement (énergie et fluides);
- entretien et maintenance (entretien courant ou exceptionnel, maintenance préventive et curative, réparations, renouvellement d'équipements et composants selon leur durée de vie...);
- travaux de modifications fonctionnelles;
- fin de vie (rénovation, démolition, recyclage...).

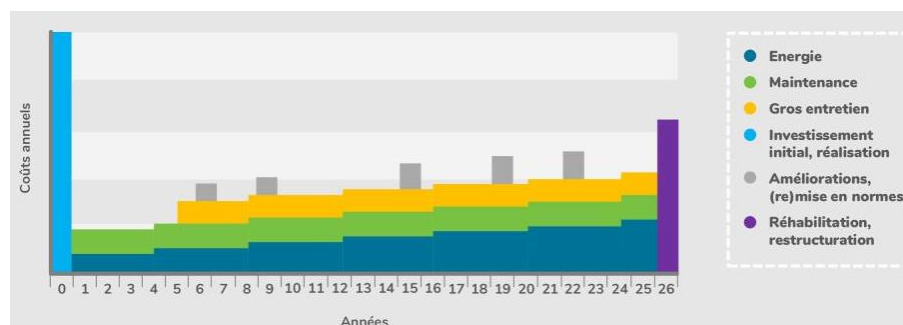


Figure 2-10 : Schéma des dépenses au cours de la vie d'un bâtiment (Guide Bâtiment Durable, 2018)

D'après Charlot-Valdieu et Outrequin (2018), les émissions de CO₂ peuvent être considérées comme externalités environnementales dans le CGE, mais sont aussi monétisables et intégrables dans le CGD par l'utilisation de valeurs de référence du prix du carbone. Cela va effectivement au-delà de l'intérêt général par préservation de l'environnement puisque des économies supplémentaires sont possibles pour les propriétaires.

Le prix carbone est un « instrument politique [qui] consiste à envoyer un signal prix et peut être défini comme une taxe environnementale sur les émissions de dioxyde de carbone qu'elle vise à limiter. [] L'émetteur de CO₂ paie pour le CO₂ qu'il émet et qui porte préjudice à l'environnement et à la santé publique ». (Conseil central de l'économie, 2019) Et l'une des deux méthodes est le recours à une taxe

sur le carbone : le Gouvernement fixe le prix à payer par les pollueurs pour chaque tonne de CO₂émise.

La tarification du carbone dans le secteur du bâtiment est déjà en application dans plusieurs pays, notamment en Europe : Danemark et Suède (depuis les années 90), Irlande (2010), France (2014)... Si, en Belgique, ce n'est pas encore le cas, la question a été étudiée lors du Débat national belge sur la tarification du carbone, en juin 2018. Il y a été envisagé une augmentation graduelle des prix, comme la plupart des pays qui l'appliquent déjà, selon 3 scénarios potentiels de trajectoire de prix. (Climat, 2018)

2.3 OUTIL : DESIGNBUILDER

DesignBuilder est un logiciel de modélisation de bâtiment et de simulation thermique dynamique, fondé sur le moteur EnergyPlus, certifié ASHRAE. Il propose une interface graphique accessible, ergonomique et riche en fonctionnalités. (Batisim, 2018)

Destiné aux architectes, ingénieurs et autres professionnels du monde de la construction ou de l'énergie et même aux étudiants, le logiciel est un outil efficace de conception de bâtiment. En plus d'évaluer les performances liées à l'énergie, au CO₂, à l'éclairage ou au confort, il permet de comparer facilement des résultats entre plusieurs designs alternatifs. (Altensis, 2015)

De plus, DesignBuilder allie construction de maquettes 3D, plus ou moins réalistes selon les besoins, et encodage de paramètres afin de rendre le travail de modélisation du bâtiment le plus efficace possible. De nombreux paramètres par défaut, templates et bibliothèques sont également mis à disposition dans le logiciel, facilitant encore davantage la tâche. (Altensis, 2015)

En entrée, le logiciel utilise cinq types de données : données géométriques (maquette), modes constructifs (matériaux), données d'activité et d'usage (occupation, apports, éclairage), systèmes CVC et régulation (chauffage, ECS, ventilation mécanique et/ou naturelle, refroidissement) ainsi que des fiches environnementales. En sortie, le logiciel fournit quatre types de données : simulations thermiques, mécanique des fluides, éclairage et rapports (métrés, tonnes de CO₂). Elles sont alors présentées sous forme de graphiques ou de tableaux. (Batisim, 2018)

La fonctionnalité la plus intéressante pour ce travail est la mise en œuvre de simulations thermiques dynamiques qui permettent d'évaluer de nombreux paramètres liés à la performance énergétique du bâtiment :

- consommations d'énergie ;
- confort (températures internes des locaux) ;
- bilan thermique (déperditions et gains thermiques de l'enveloppe) ;
- dimensionnement de systèmes CVC...

(Batisim, 2018)

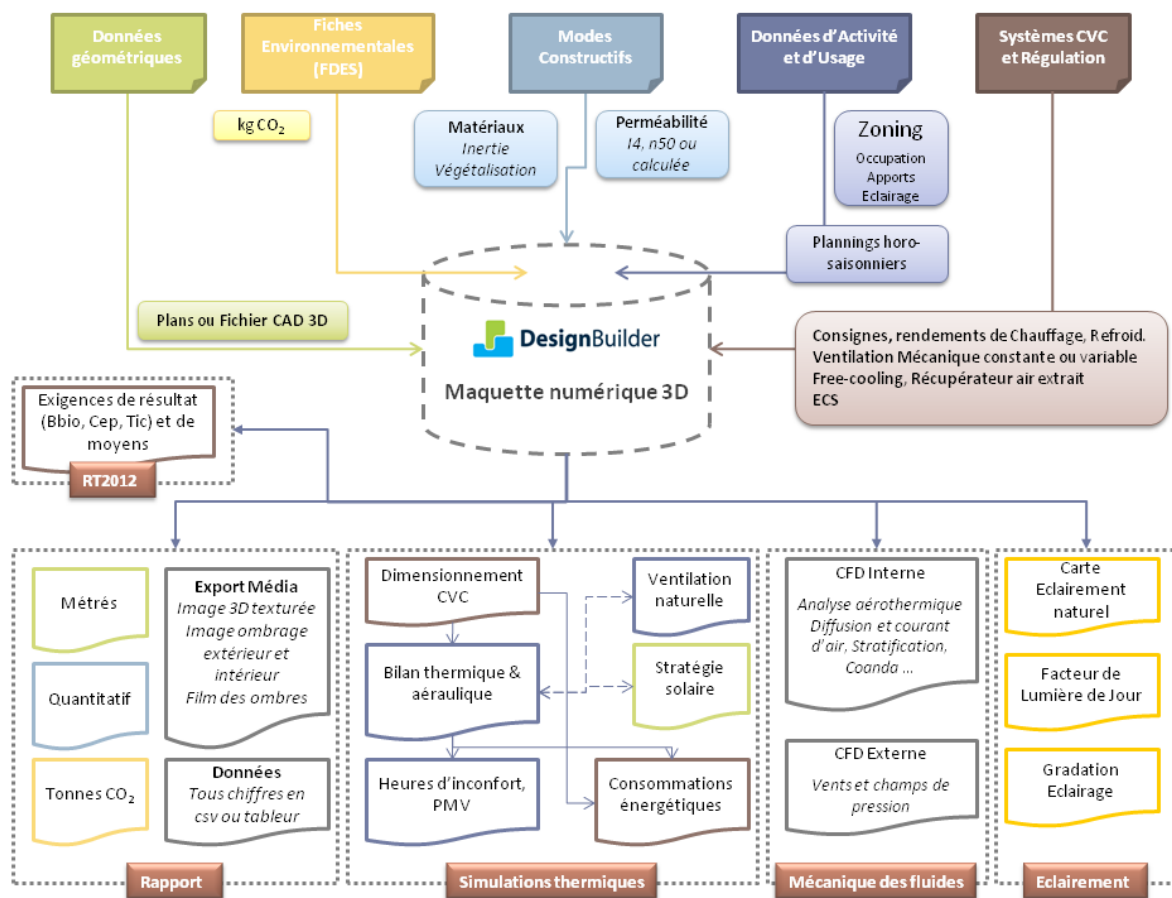


Figure 2-11 : Schéma de fonctionnement du logiciel DesignBuilder (Batisim, 2018)

Quant à EnergyPlus, il s'agit d'un programme de simulation énergétique pour les bâtiments, financé par le département de l'Énergie des États-Unis (DOE) et le Bureau des Technologies du bâtiment (BTO). Il est destiné à la modélisation de consommation d'énergie (chauffage, refroidissement, éclairage, ventilation, etc.) et d'eau. Assez complexe à appréhender, le programme est souvent utilisé via des interfaces graphiques plus accessibles, tel que DesignBuilder. (EnergyPlus, s. d.)

2.4 ETUDES SIMILAIRES

La dernière étape avant d'être prêt à élaborer une méthodologie juste et pertinente est de faire un tour d'horizon des études similaires à celle-ci. Ces études peuvent traiter du même thème et/ou employer une méthodologie semblable. Dans cette section, il est choisi de répertorier, de manière non exhaustive, des recherches basées sur l'étude d'un ou plusieurs impacts résultant de la rénovation énergétique de logements. Les quatre types d'impact considérés correspondent aux concepts clés présentés un peu plus tôt : performance énergétique, impacts environnementaux, confort et coûts.

2.4.1 Études ciblées

Les travaux de recherche listés dans le Tableau 2-1 se focalisent sur l'étude d'un impact en particulier.

Tableau 2-1 : Etudes d'impact résultant de la rénovation énergétique de logements

Titre	Référence	Lieu
Performance énergétique		
<p><i>Energy efficient renovation of belgian houses : sensitivity analysis for thermal bridges</i></p> <p>Rénovation énergétique efficace des maisons belges : analyse de sensibilité pour les ponts thermiques</p>	(Van Craenendonck et al., 2016)	Belgique (Flandre)
<p><i>Actual energy savings of renovated dwellings : the case of Amsterdam</i></p> <p>Économies d'énergie réelles des logements rénovés : le cas d'Amsterdam</p>	(Filippidou et al., 2016)	Pays-Bas (Amsterdam)
<p><i>Passive house renovation of a block of flats - Measured performance and energy signature analysis</i></p> <p>Rénovation passive d'un immeuble collectif - Performances mesurées et analyse de la signature énergétique</p>	(Rose et al., 2022)	Danemark
<p><i>Thermal performance optimization of envelope in the energy-saving renovation of existing residential buildings</i></p> <p>Optimisation des performances thermiques de l'enveloppe dans la rénovation énergétique des bâtiments résidentiels existants</p>	(Huang et al., 2021)	Chine (Beijing)
Impacts environnementaux		
<p><i>Explorative life-cycle assessment of renovating existing urban housing-stocks</i></p> <p>Bilan exploratoire du cycle de vie de la rénovation des parcs de logements urbains existants</p>	(Österbring et al., 2019)	Suède
<p><i>Long-term indoor formaldehyde variations and health risk assessment in Chinese urban residences following renovation</i></p> <p>Variations à long terme du formaldéhyde en intérieur et évaluation des risques pour la santé dans les résidences urbaines chinoises après rénovation</p>	(Liang, 2021)	Chine
Confort		

<i>Relation between indoor thermal environment and renovation in Liege residential buildings</i> Relation entre environnement thermique intérieur et rénovation dans les immeubles d'habitation liégeois	(Singh et al., 2014)	Belgique (Liege)
<i>Comparison and statistical analysis of long-term overheating indices applied on energy renovated dwellings in temperate climates</i> Comparaison et analyse statistique des indices de surchauffe à long terme appliqués aux logements rénovés énergétiquement en climat tempéré	(Psomas et al., 2016)	Suède
Coûts		
<i>Energy savings in retrofitted dwellings : economically viable ?</i> Économies d'énergie dans les logements rénovés : économiquement viable ?	(Verbeeck & Hens, 2005)	Belgique
<i>How much will it cost ? An energy renovation analysis for the Portuguese dwelling stock</i> Combien ça coûtera ? Une analyse de la rénovation énergétique du parc de logements portugais	(Palma et al., 2022)	Portugal
<i>Cost-effective passive house renovation packages for Swedish single-family houses from the 1960s and 1970s</i> Rentabilité économique de la rénovation passive pour les maisons unifamiliales suédoises des années 1960 et 1970	(Ekström et al., 2018)	Suède

2.4.2 Études globales

Les trois travaux de recherche présentés ici réalisent une analyse multicritère sur des logements unifamiliaux. Si les approches sont différentes, ils évaluent tous les trois, au moins partiellement, à la fois la performance énergétique, les impacts environnementaux et les coûts du cycle de vie des cas étudiés. La troisième étude s'intéresse également au niveau de confort.

Galimshina et al. (2021) - Suisse

« *What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for building renovation ? Not the usual one*

Quelle est la solution environnementale robuste et rentable optimale pour la rénovation de bâtiments ? Pas l'habituelle »

L'approche choisie par cette recherche est l'optimisation de mesures de rénovation pour atteindre des scénarios à la fois économiquement efficaces et

respectueux du climat. L'étude est menée sur deux habitations typiques suisses, l'une avec une performance énergétique basse et l'autre, élevée.

Les étapes qui constituent la méthodologie suivie sont :

- Création d'un modèle intégré pour l'analyse du cycle de vie (ACV) et l'analyse du coût du cycle de vie (ACCV) ;
- Définition de mesures et de niveaux potentiels de rénovation ;
- Identification et description des paramètres incertains (production, remplacement, déconstruction...) dans l'ACV et la ACCV ;
- Réalisation d'une optimisation robuste multi-objective pour identifier les solutions de rénovation optimales.

Les principales conclusions tirées des résultats obtenus sont que :

- le remplacement du système de chauffage dans l'habitation rénovée est crucial pour réduire l'impact environnemental ;
- pour un logement avec déjà de bonnes performances énergétiques, les coûts d'investissement ne sont pas rentabilisés par les économies sur l'énergie ;
- la solution optimale pour le bâtiment avec une performance énergétique faible est la combinaison de la rénovation de l'enveloppe et du remplacement du système de chauffage.

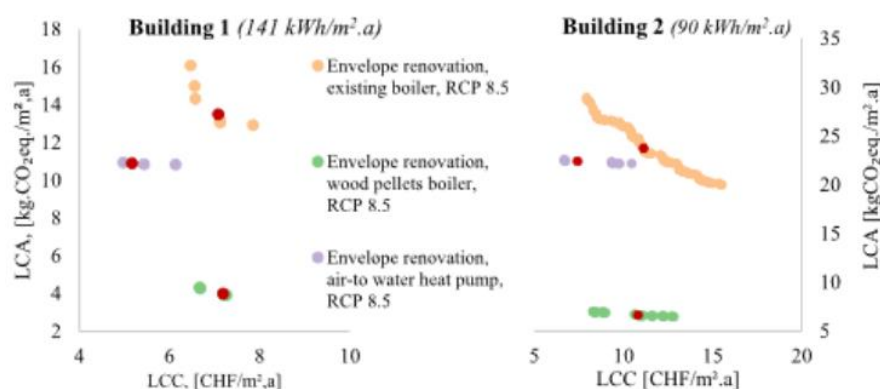


Figure 2-12 : Résultats d'ACV et ACCV pour des systèmes de chauffage différents (Galimshina et al., 2021, p.2)

Allacker et al. (2011) - Belgique

« Sustainability, financial and quality evaluation of dwelling types - Sufiquad

Évaluation de la durabilité, des aspects financiers et de la qualité des types de logements - Sufiquad »

Les auteurs de cette étude ont choisi une approche intégrée à l'échelle du bâtiment et tenant compte de toutes les influences et parties prenantes :

- l'évaluation financière (coûts d'investissement et analyse du coût du cycle de vie - ACCV) ;
- l'évaluation environnementale (analyse du cycle de vie - ACV et externalités environnementales) ;
- l'évaluation de la performance (analyse multicritère - MCA).

Les objectifs de la recherche sont de développer une méthodologie et un outil pour évaluer à la fois les coûts (initiaux et futurs) et les bénéfices de différentes typologies d'habitation et, surtout, de clarifier les conflits potentiels relatifs à la sélection de ces différents types de coûts.

L'outil développé a été mis à l'essai sur 3 types d'éléments : des composants de bâtiment, des logements neufs représentatifs et des mesures de rénovation.

Pour les essais liés à la rénovation, deux cas d'étude de différentes époques de construction ont été sélectionnés : une maison mitoyenne construite avant 1945 et une maison quatre façades construite entre 1971 et 1990.

En premier lieu, des mesures de rénovation entraînant une économie d'énergie ont été évaluées et comparées à l'aide de l'outil, moyennant une analyse de sensibilité. Les résultats obtenus mènent à deux conclusions. D'abord, la réduction des coûts d'externalité environnementale sur le cycle de vie est constatée pour les deux habitations mais elle est plus marquée pour le bâtiment plus ancien (plus faible valeur d'isolation initiale et plus vieux équipements). Ensuite, la rénovation n'est financièrement intéressante que pour la plus vieille maison.

En second lieu, une comparaison a été réalisée entre les habitations non rénovées, les habitations rénovées et de nouvelles constructions. Pour le logement le plus ancien, le cas sans rénovation a le plus haut coût de cycle de vie et le cas d'une rénovation, le plus bas. Pour l'habitation plus récente, il en est de même pour l'ACV mais pour l'analyse des coûts, celui du cas non rénové est le plus bas. Ces conclusions sont valables pour une durée d'étude de 60 ans. Si la durée est prolongée, la rénovation gagne en intérêt au niveau de l'ACCV.

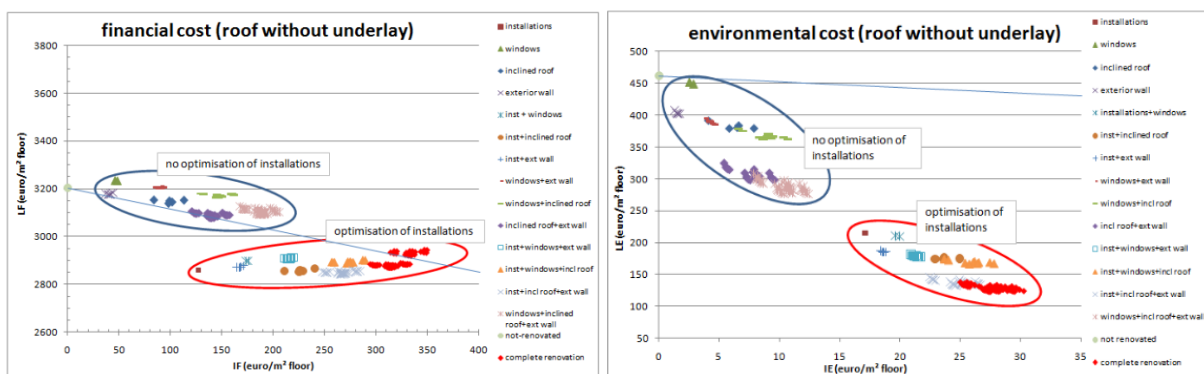


Figure 2-13 : Coûts financiers (à gauche) et environnementaux (à droite) sur 60 ans pour l'ancien bâtiment, initiaux (IF) et sur le cycle de vie (LF) (Allacker et al., 2011, p. 67 et 69)

PMP (2021) - Bruxelles

« Brochure rénovation Bruxelles : estimation des coûts et économies » (Maison Passive pmp, 2020a)

L'étude menée par Maison Passive se base sur des audits réalisés sur les cas d'étude. Leur but est de réaliser une brochure présentant une estimation des coûts et des économies possibles lors d'un projet de rénovation énergétique pour répondre aux questions de potentiels rénovateurs.

Deux cas sont étudiés : une maison quatre façades du début des années 90 et une habitation 2 façades typique du milieu urbain. A ces cas d'étude sont appliqués quatre scénarios de rénovation, croissants en performance énergétique :

- une rénovation de base = travaux nécessaires pour le bon fonctionnement et la salubrité du logement mais sans volonté d'amélioration énergétique ;
- une rénovation « objectif stratégie » = selon les exigences fixées par les Primes Énergie 2019 et les objectifs de la Stratégie rénovation de Bruxelles ;
- une rénovation « sobriété énergétique » = inspirée de la rénovation passive ;
- une rénovation « passive » = matériaux d'origine naturelle privilégiés.

L'étude s'intéresse à quatre types d'impact : la performance énergétique (conso en énergie primaire), les émissions de CO₂, divers résultats économiques et des indices de confort.

Les résultats constatés, pour tous les scénarios, sont, en plus d'une réduction de la consommation d'énergie, une amélioration du niveau de confort (température intérieure moyenne plus élevée en hiver, moins de mouvements d'air), des économies sur la facture d'énergie et une réduction des émissions de CO₂.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Consommation annuelle d'énergie primaire (kWh/m²/an)	120	80	50	30	20
Émissions de CO ₂ (kg/m²/an)	15	10	6	4	3
Coût de rénovation (€)	10000	15000	25000	35000	45000
Économies annuelles (€)	0	1000	2000	3000	4000
Retour sur investissement (ans)	-	15	12	10	8
Indice de confort	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

Figure 2-14 : Visuel des résultats (Maison Passive pmp, 2020, p. 12)

2.4.3 Manquements

Par l'exploration à l'échelle internationale des recherches similaires à celle-ci, certains manquements peuvent être décelés.

D'abord, peu d'études considèrent simultanément les 4 paramètres qui ont été déterminés comme importants dans un projet de rénovation. Parfois, les impacts environnementaux, ou au moins les émissions de CO₂, sont négligés et très souvent, le confort des occupants n'est pas du tout considéré. Il s'agit pourtant de la première motivation pour le lancement de travaux de rénovation.

La dernière étude passée en revue, réalisée par Maison passive (Maison Passive pmp, 2020a) semble couvrir les quatre types d'impact mais elle ne monétise

pas les émissions de CO₂. Cette configuration est pourtant intéressante à considérer, l'application future d'une tarification carbone en Belgique n'étant pas impossible.

Ensuite, la réalisation d'une étude d'impact de mesures de rénovation fait intervenir des normes, exigences, données climatiques, etc. en lien avec le territoire considéré. Ce type d'étude pourrait donc être appliqué à la Wallonie, afin de récolter des résultats en lien direct avec la région et ses spécificités.

Enfin, la plupart des travaux de recherche parcourus ne considèrent pas de limite de budget fixe pour l'élaboration des scénarios de rénovation. Ils considèrent même souvent des rénovations poussées mais coûteuses, en valorisant leur rentabilité. Mais tous les ménages ne peuvent se permettre de financer de tels travaux, malgré l'existence d'aides à cet effet. S'inscrire, pour cette étude, dans une limite de budget pourrait rendre les résultats obtenus applicables à davantage de projets.

3 MÉTHODOLOGIE

Le sujet principal de ce travail ainsi que les concepts importants associés ont été définis et développés par une revue minutieuse de la littérature. Il est maintenant possible d'utiliser cette base de connaissance pour concevoir une méthodologie permettant de répondre à la question de recherche.

Ce troisième chapitre, cœur de ce travail, détaille la méthodologie conçue et mise en œuvre en six grandes étapes : la définition de la méthodologie générale, la sélection du cas d'étude, la modélisation du cas de base, l'élaboration des scénarios de rénovation, la modélisation des scénarios de rénovation et, enfin, le traitement des données.

3.1 MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

3.1.1 Questions de recherche

Pour rappel, la principale question dont il est question dans de ce travail est :
« Pour une habitation wallonne en milieu urbain typique et un investissement financier initial de maximum 60.000€, quelles sont les mesures de rénovation à privilégier ? »

Afin de guider l'étude à mettre en place pour y répondre, cette question principale est subdivisée en trois sous-questions :

- Quel est l'impact de certaines mesures de rénovation sur la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ et le niveau de confort thermique d'un cas d'étude ?
- Quelles sont les économies financières possibles sur le long terme ?
- Quelle est la sensibilité de ces quatre paramètres (consommations, émissions, confort et coûts) face à la variation de certaines mesures étudiées ?

La méthodologie qui est décrite dans ce chapitre a pour but de répondre à ces trois questions.

3.1.2 Description de l'étude

La stratégie globale choisie pour mener cette étude est l'analyse d'un cas d'étude réel « archétype » par modélisation et simulation thermique dynamique.

Plus précisément, les étapes établies pour rencontrer les objectifs visés et obtenir les résultats escomptés sont les suivantes.

1. Revue de la littérature

Durant cette première partie, le sujet traité (rénovation énergétique) ainsi que des concepts clés pour l'étude ont été explorés et définis. L'outil principalement

utilisé, DesignBuilder, a été rapidement présenté. Une revue des études similaires a finalement permis d'identifier les manquements dans la littérature, auxquels la recherche peut tenter de remédier. L'utilité de cette étape théorique était de mener à la mise au point d'une méthodologie juste, pertinente et réaliste.

2. Sélection du cas d'étude

L'étude se base sur un cas d'étude réel « archétype ». La première étape est donc de fixer un certain nombre de critères que le cas se doit de respecter pour être représentatif des logements des grandes villes wallonnes et de faible performance énergétique. Un logement répondant aux critères est alors choisi parmi les dossiers de Liège-Énergie et toutes les données concernant l'habitation sont récoltées (morphologie, construction, systèmes, activité...).

3. Modélisation du cas de base

L'habitation sélectionnée comme cas d'étude est modélisée dans le logiciel simulation thermique dynamique choisi : DesignBuilder. Le modèle est d'abord paramétré en suivant les caractéristiques de l'état existant, avant rénovation. Après une première simulation, le modèle est calibré et validé, afin de s'assurer que la version finale représente au mieux à la réalité.

4. Élaboration des scénarios de rénovation

Plusieurs variables, représentant les mesures de rénovation étudiées, sont choisies au sein de six grands thèmes : isolation, menuiseries, étanchéité, systèmes, ventilation et énergies renouvelables. Elles sont alors caractérisées grâce à une deuxième phase de récolte de données. Les scénarios de rénovation sont construits à partir de ces variables. L'étude repose sur six scénarios. Les deux premiers sont des scénarios complets, l'un pour une rénovation de base (objectif PEB), l'autre pour une rénovation poussée (objectif passif). Les quatre autres sont des scénarios intermédiaires se concentrant sur quatre des thèmes ci-dessus. Le coût d'investissement initial est directement évalué pour chaque scénario afin de s'assurer que le budget maximal est respecté.

5. Modélisation des scénarios de rénovation

Tout comme le cas de base, les scénarios sont modélisés dans le logiciel DesignBuilder. Ils sont d'abord paramétrés tels qu'ils ont été caractérisés précédemment. Puis une étude de sensibilité portant sur les quatre scénarios intermédiaires est définie et modélisée afin d'explorer davantage ces configurations et leurs variations.

6. Traitement des données

L'étude s'intéresse à quatre paramètres : consommations d'énergie, émissions de CO₂, confort thermique et coûts. Si les données de consommation issues des simulations sont directement exploitables, les trois autres paramètres demandent de traiter les données brutes obtenues dans le logiciel selon des méthodologies spécifiques. Tous les résultats attendus peuvent enfin être présentés, analysés et comparés (voir chapitre 4).

La Figure 3-1 schématise la méthodologie générale élaborée et suivie pour cette recherche.

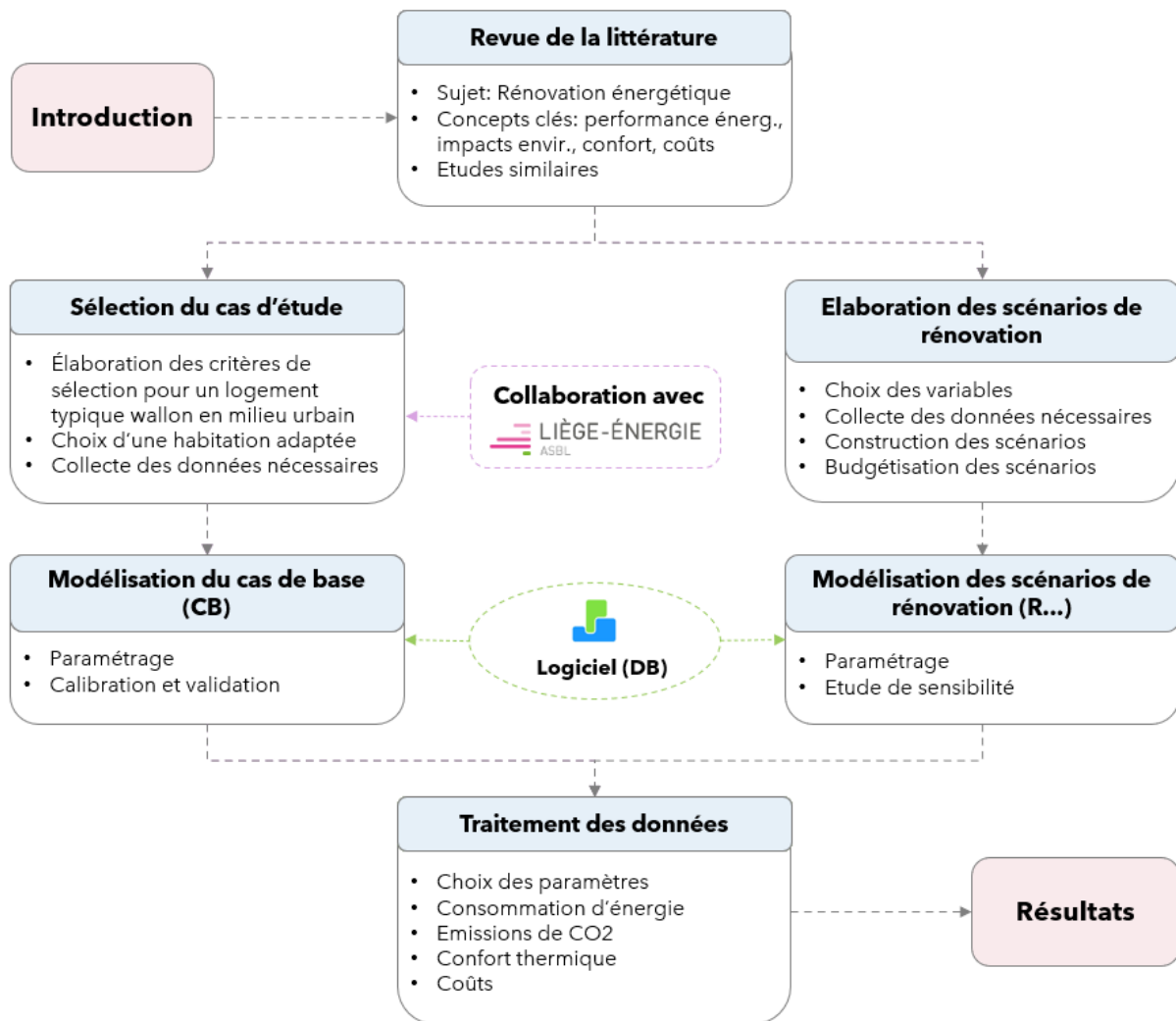


Figure 3-1 : Schéma méthodologique général

3.1.3 Délimitation de l'étude

Cette étude est définie, comme le titre le spécifie, par cinq grands axes :

1. Rénovation énergétique

L'intervention architecturale dont il est question est la rénovation énergétique, c'est-à-dire la transformation d'un bâtiment existant dans le but d'en améliorer les performances énergétiques. Les mesures de rénovation envisagées ne concernent donc ni la remise en salubrité ou conformité, ni l'amélioration esthétique du bâti puisque celles-ci n'ont pas d'impact direct sur la performance du bâtiment.

2. Logements

Seul le bâti à fonction d'habitat unifamilial est considéré. Les autres activités (industrielles, commerciales, scolaires, etc.) ou autres types d'habitat (collectif) ne sont donc pas directement désignés. La typologie exacte concernée (maison

mitoyenne de grande ville) est même définie davantage au cours du travail et influence les conclusions à tirer de cette étude.

3. Wallonie

Le territoire sur lequel porte l'étude est la Wallonie. La majorité des considérations politiques, réglementaires, économiques, etc. sont donc considérées à l'échelle de la Région wallonne ou, à défaut, de la Belgique. De ce fait, il est possible qu'en changeant de territoire, certaines considérations sur lesquelles reposent cette étude viennent à changer et aient un impact sur les résultats finaux obtenus.

4. Budget limité

Une limite de budget est fixée à 60.000€, montant maximal accordé dans le cadre d'un prêt à taux zéro. Puisqu'une demande de prêt reste une démarche administrative coûteuse en temps et énergie, il n'est pas considéré que les propriétaires soient requis de contracter deux prêts. Tous les scénarios sont donc élaborés dans le respect de ce budget.

Cette limitation de budget a également pour intérêt de favoriser l'amélioration énergétique du stock bâti existant par la rénovation partielle d'un plus grand nombre de logements, puisque plus accessible, plutôt que par la rénovation optimale (A/A+, passif, Q-ZEN...) mais très coûteuse d'une poignée d'entre eux.

De plus, les subsides et primes dont il est possible de bénéficier dans le cadre de projet de rénovation ne sont pas pris en compte dans un premier temps. Les montants accordés sont trop incertains et variables dans le temps que pour assurer la validité des résultats économiques si elles sont considérées dans ce travail.

5. Etude d'impact

L'objectif méthodologique est d'effectuer une étude de sensibilité de mesures de rénovation. Les listes des variables et des paramètres de sortie (voir sections 3.4.1 et 3.6.1) sont définies et exhaustives. Toute autre élément n'est pas considéré.

3.2 SÉLECTION DU CAS D'ÉTUDE

3.2.1 Élaboration de critères de sélection

La première étape du choix d'un cas d'étude a été de définir des critères permettant de sélectionner un archétype, un cas de référence à la fois représentatif du logement urbain liégeois et adapté à ce travail de recherche.

À la suite de la première entrevue avec Liège-Énergie, une première grille de critères a pu être réalisée. Celle-ci a été voulue la plus détaillée possible afin de guider la recherche du cas « idéal ».

La grille s'organise selon plusieurs thèmes : localisation, typologie et morphologie, ménage, données de consommation, état du logement avant travaux et avancement du projet de rénovation. Certains critères ont été mentionnés

comme obligatoires, tandis que d'autres pouvaient être discutés en fonction de la difficulté à trouver un cas répondant à tous les critères.

La seconde colonne du tableau permet de justifier le choix de ces critères.

Tableau 3-1 : Grille de critère de sélection du cas d'étude

Critère (* obligatoire)	Justification
Localisation	
Ville de Liège *	Grande ville wallonne la plus proche 50% des dossiers de Liège-Énergie
Tissu continu ancien ou d'extension *	Représentatif du tissu en milieu urbain
Typologie et morphologie	
Mitoyen *	Représentatif du logement de tissu continu ancien ou d'extension
3 étages (R+2)	
Moins de 200m ²	
Ménage	
Unifamilial *	Type de ménage principal pour des propriétaires occupants de maisons
2 parents de moins de 50 ans	
2 enfants	
Pas de revenus précaires ou modestes *	Pas de prise en compte de primes en premier lieu et 50% des dossiers de Liège-Énergie
Données de consommation	
Gaz et électricité *	Données minimales pour obtenir un modèle, donc des résultats, précis et représentatifs
Annuelles (idéalement mensuelles) *	
Sur 3 ans (apprécié jusque 5 ans) *	
État du logement avant travaux	
Label F ou G *	Cibles de l'appel à projet de la Région wallonne Plateformes locales
Salubre, habitable *	Pas de prise en compte de travaux de salubrité
Diversité des travaux réalisables *	Plusieurs scénarios explorables : châssis, chaudière, isolation, panneaux solaires...
Avancement du projet de rénovation	
Audit réalisé *	Source de données nécessaires
Devis réalisé	Source de données utiles
Travaux non réalisés	Données inutiles, voire conflictuelles

3.2.2 Sélection de l'habitation

Guidé par la grille de critères de sélection, Liège-Énergie a pu me proposer quatre dossiers correspondant plus ou moins fidèlement à celle-ci. Parmi eux, le dossier 3 s'est montré particulièrement prometteur et a donc été choisi comme cas d'étude. Les dossiers 1 et 2 ont quant à eux été gardés comme cas d'étude de secours, dans le cas où le 3 ne pourrait plus remplir sa fonction.

Tableau 3-2 : Réponses aux critères de sélection des quatre dossiers potentiels

Critère (obligatoire *)	1	2	3	4
Localisation				
Ville de Liège *	Chênée	Liège	Liège	Liège
Tissu continu ancien ou d'extension *	ok	ok	ok	ok
Typologie/morphologie				
Mitoyen *	ok	ok	ok	~
3 étages (R+2)	R+1	R+1	R+2	R+2
Moins de 200m ²	132m ²	206m ²	162m²	248m ²
Ménage				
Unifamilial *	ok	ok	ok	ok
2 parents de moins de 50 ans	ok	ok	ok	ok
2 enfants	1	0	1	0
Pas de revenus précaires ou modestes *	ok	ok	ok	ok
Données de consommation				
Gaz et électricité *	ok	ok	ok	ok
Annuelles (idéalement mensuelles) *	ok	ok	ok	ok
Sur 3 ans (apprécié jusque 5 ans) *	ok	ok	ok	ok
Etat du logement avant travaux				
Label F ou G *	E	E	E	F
Salubre, habitable *	ok	ok	ok	X
Diversité des travaux réalisables *	ok	ok	ok	ok
Avancement du projet de rénovation				
Audit réalisé *	ok	ok	ok	ok

Devis réalisé	ok	ok	ok	ok
Travaux non réalisés	ok	ok	ok	ok

L'habitation correspondant au dossier 3 ne respecte néanmoins pas deux des critères de sélection.

Le premier concerne le ménage. Le couple n'a qu'un seul enfant à charge et non deux comme espéré. Il ne s'agit toutefois pas d'un critère obligatoire et aucun des autres dossiers présentés ne comprend de ménage avec deux enfants. Cette légère dérogation aux critères est donc acceptable.

Le deuxième, plus critique, concerne l'état du logement avant travaux. En suivant les consignes de l'appel à projet de la Région wallonne pour les plateformes locales de rénovation, nous avons visé un label initial F ou G. Cependant, les habitations mitoyennes présentent facilement un label E initial, les déperditions thermiques vers l'extérieur étant nettement limitées. Des dossiers proposés, seul le 4 présentait un label F initial. Cela s'explique par une mitoyenneté imparfaite, donc des déperditions thermiques plus importantes que dans les autres dossiers. Un label E initial a donc été accepté, pour peu que le caractère mitoyen de l'habitation soit satisfaisant.

La dernière étape, avant de valider le choix de cette habitation comme cas d'étude, était la prise de contact avec les propriétaires et l'obtention de leur accord de participation à l'étude. Une fiche de consentement leur a été transmise et a permis d'officialiser la collaboration, dans le cadre de cette recherche, entre les propriétaires et moi-même, représentée par mon promoteur le prof. Shady Attia.

3.2.3 Collecte des données

La collecte des données sur le cas d'étude pouvant bénéficier à la recherche s'est déroulée en trois temps.

D'abord, toute la documentation à la disposition de Liège-Énergie m'a été transmise. Celle-ci était déjà très riche et couvrait de nombreux aspects : situation familiale et financière, démarches de demande de prêt, audit réalisé et travaux projetés... Le document le plus pertinent concernant l'état initial de l'habitation est évidemment le rapport d'audit. Celui-ci fournit les différents niveaux de performance énergétique du bâtiment, la composition de toutes les parois ainsi que la composition des installations de chauffage et d'ECS.

Ensuite, une visite des lieux et un entretien avec les propriétaires ont été nécessaires afin de pallier les données manquantes au dossier :

- les plans, coupes et façades de la maison ;
- les habitudes d'occupation des espaces et de consommation d'énergie (chauffage et éclairage) ;
- des informations spatiales ou techniques supplémentaires sur certains équipements (thermostat, chaudière et boiler).

Pour finir, les relevés de consommation d'énergie du bâtiment, nécessaires pour calibrer et valider le modèle, ont été fournies par Resa. Il s'agit de données de consommation de gaz et d'électricité annuelles aux cours des années 2019, 2020 et 2021.

3.2.4 Présentation brève de l'habitation

L'habitation choisie comme cas d'étude est une maison unifamiliale mitoyenne située à Liège construite, de mémoire des propriétaires, en 1830.



Figure 3-2 : Photo de la façade avant de l'habitation (briques rouges)

Le ménage, qui habite la maison depuis 2019, se compose du couple propriétaire et de leur enfant en bas âge. Souhaitant mener un projet de rénovation, ils ont effectué une demande de prêt à taux zéro auprès de Liège-Énergie en mai 2021.

L'habitation peut être considérée en deux parties : un volume principal côté rue et un volume annexe côté jardin.

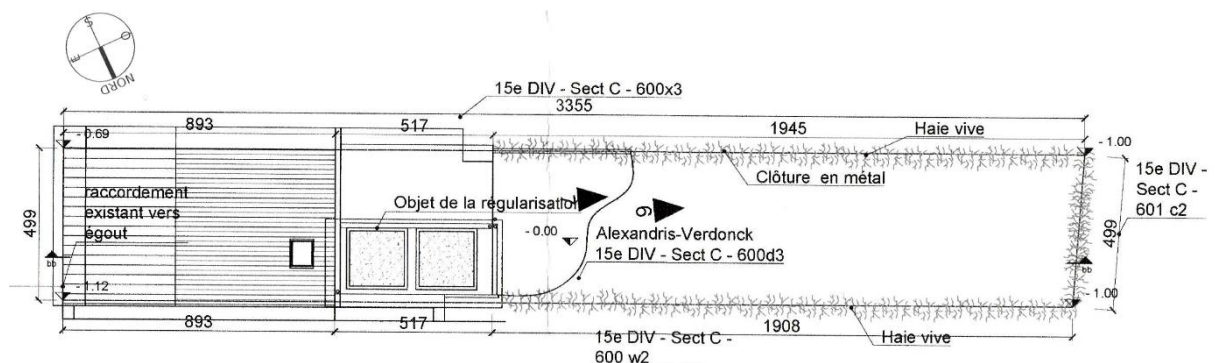


Figure 3-3 : Plans d'implantation de l'habitation

Le volume principal (4,99m de large pour 8,93m de profondeur) se développe sur 4 niveaux : caves, rez-de-chaussée et deux étages. Au rez-de-chaussée, il contient le hall d'entrée, la cuisine et la salle à manger. Aux étages, on retrouve deux

chambres en R+1 puis deux espaces utilisés comme rangement en R+2. La toiture, en double pente avec une partie mansardée, abrite des combles inaccessibles.

Le volume annexe, en toiture plate, prolonge l'habitation de 5,17m. La partie gauche, d'origine, s'élève sur deux étages et propose un espace salon en RDC et une salle de bain en R+1. La partie gauche, ajoutée par la suite, n'est que d'un niveau et complète l'espace salon. Elle est éclairée par une baie vitrée et de larges percements en toiture.

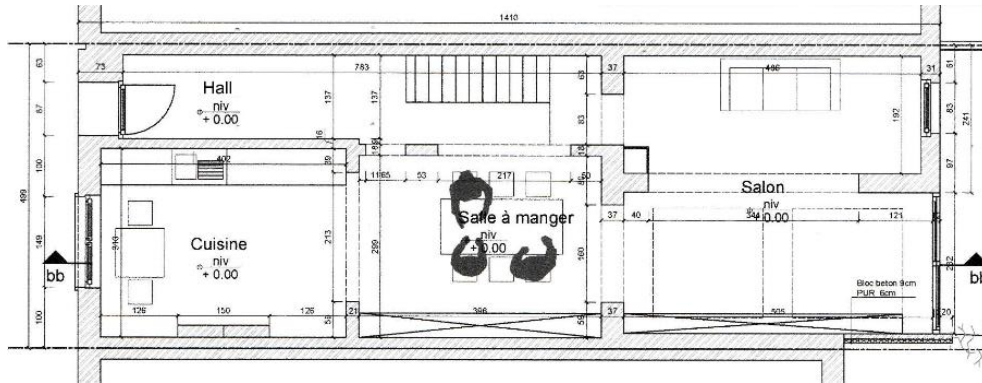


Figure 3-4 : Plans du RDC de l'habitation

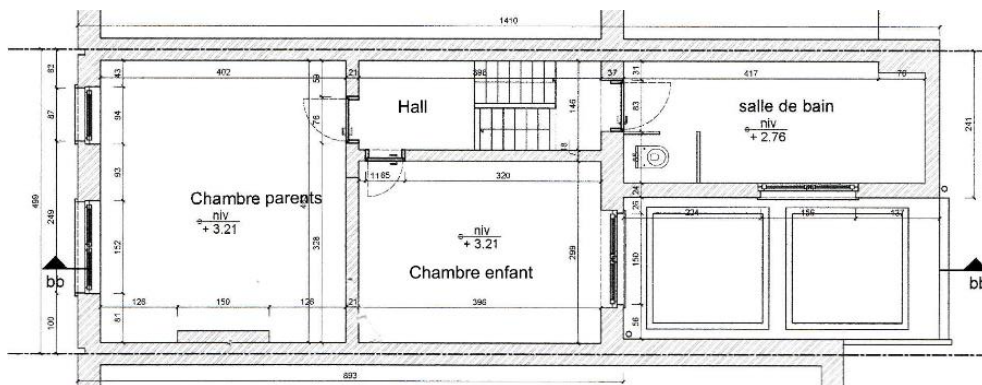


Figure 3-5 : Plans du R+1 de l'habitation

La structure générale du bâtiment consiste en une ossature traditionnelle : maçonnerie de brique, hourdis, fondation en béton et charpente en bois. La grande majorité des parois ne sont pas du tout isolées et l'étanchéité a été estimée lors de l'audit comme étant médiocre. Les fenêtres (à l'exception de la baie vitrée et des coupoles dans le salon) ont par contre été remplacées en 2013 et ont donc une performance énergétique correcte.

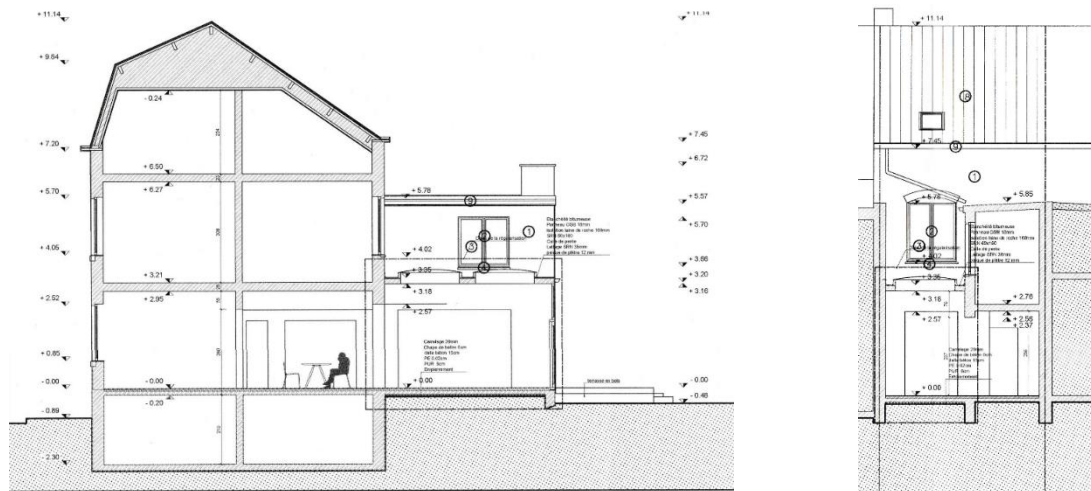


Figure 3-6 (à gauche) : Coupe longitudinale de l'habitation
 Figure 3-7 (à droite) : Coupe transversale de l'habitation

Les seules installations techniques présentes actuellement dans l'habitation sont celles pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire. Aucun système de refroidissement ou de ventilation des espaces n'existe.

Le chauffage central est assuré par une chaudière murale au gaz et à condensation (modèle Smartron de *Elco*). Celle-ci est associée à des radiateurs pour une émission à haute température, présents dans toutes les pièces sauf les caves, les halls et, bien sûr, les combles inaccessibles. Les deux espaces de rangement du R+2 ne sont toutefois pas chauffés. Le chauffage est régulé par un thermostat d'ambiance placé dans la chambre d'enfant.

La production d'ECS est permise par un boiler externe couplé à la chaudière (modèle Vistron U120/U150 par *Elco*). Les deux équipements sont situés à l'extérieur d'un espace chauffé puisqu'ils se trouvent à la cave.



Figure 3-8 : Photo des installations de chauffage et de production d'ECS

Les propriétaires ont confié être présents dans le séjour la majorité du temps et de ne se rendre dans les chambres que pour y dormir. Travaillant tous deux, ils sont absents en journée en semaine.

3.3 MODÉLISATION DU CAS DE BASE

3.3.1 Paramétrage

Une fois le cas d'étude sélectionné et l'ensemble des données le concernant récoltées, l'habitation dans son état de base (non rénové) peut enfin être modélisé. Pour cela, le logiciel de modélisation et de simulation thermique dynamique est utilisé. A la fois performant et accessible, cet outil est tout à fait pertinent pour ce travail.

Un des avantages de DesignBuilder est que celui-ci propose un grand nombre de valeurs par défaut ou de templates pré-enregistrés. Ceux-ci ont été conservés dès que les informations sur le cas d'étude ne les contredisaient pas.

Cette section présente, dans les grandes lignes, les modifications effectuées sur le fichier de base pour que le modèle représente au mieux l'habitation. Tous les encodages sont par contre présentés en détail dans un fichier Excel en annexe.

Localisation et données météo

La localisation pour le modèle est celle qui est la plus proche de celle du cas d'étude, c'est-à-dire Bierset (Aéroport de Liège, Belgique).

Le fichier de données météo pré-enregistrées dans DesignBuilder le plus proche étant par contre celui de Beek (Pays-Bas), un fichier plus proche a été recherché. C'est finalement celui de Liège, téléchargé sur le site Climate.Onebuilding, qui est choisi pour le modèle. (Climate.Onebuilding, s. d.)

Géométrie et zonage

La construction a dû être orientée. L'angle de la façade avant par rapport au nord dans le sens des aiguilles d'un montre est de 25°.

Le bâtiment est divisé en cinq blocs, correspondants aux cinq niveaux réels : cave, rdc, r+1, r+2, combles. Chaque bloc est lui-même réparti en zones selon la différence de caractéristique (activité, chauffage, enveloppe...). En général, les zones correspondent aux pièces de la maison.

Les deux maisons mitoyennes sont modélisées comme des blocs « adiabatic » et le sol par un bloc « ground », tous de 3m de profondeur.

Les ouvertures, très différentes les unes des autres, sont modélisées directement dans la géométrie.

Activité

Toutes les zones sont occupées à l'exception des combles, non-accessibles. Pour celles-ci, la densité d'occupation est déterminée par DesignBuilder à partir du nombre d'occupants renseigné, c'est-à-dire 3. Choisir de donner directement le nombre de personnes plutôt que l'unité demandée par défaut (nombre de personne par m² de surface occupée) permet d'assurer un calcul automatiquement correct en fonction de la surface occupée évaluée par le logiciel.

Quatre programmes d'occupation sont définis selon le type d'espace : pièce de vie, chambre, salle de bain ou autre (hall, cave et rangement). Ils sont basés sur les habitudes d'occupation des propriétaires ou sur les habitudes générales dans une maison.

Le nombre de jours fériés par année est fixé à 10, nombre moyen de jours fériés (hors week-end) par an en Belgique.

Les seuls espaces alimentés en eau chaude sanitaire sont la cuisine et la salle de bain. Les valeurs de consommation sont évaluées à partir de la moyenne trouvée sur Energy Plus Le Site : 50 l/m² par jour et par personne (Energy Plus Le Site, 2007b).

La température de référence, à assurer dans les pièces chauffées, est fixée à 20°C lors des plages horaires de présence (en semaine 18h-8h, le week-end et les jours fériés). La température de retour, à conserver dans les pièces le reste du temps pour éviter qu'elles ne refroidissent trop, est de 18°C lors de l'absence des propriétaires (en semaine 8h-18h).

Les besoins en éclairage des zones (lux) est estimé à partir des données moyennes fournies par Livios. (Livios, s. d.)

Les consommations électriques par les électroménagers ne sont considérées que pour l'espace le plus impactant à ce niveau, c'est à dire la cuisine.

Construction

Tous les types de parois constituant l'enveloppe de l'habitation sont créés dans le logiciel, selon les parois décrites dans l'audit ou sur les plans. Au final, on retrouve dix-sept types de parois : huit murs, trois toitures, cinq planchers et une porte extérieure.

Les parois sont composées à partir de matériaux également créés dans DesignBuilder. Leurs propriétés ont été reprises dans l'audit ou sur le site Energy Plus Le Site. (Energie Plus Le Site, 2007a)

Toutes les compositions de parois, ainsi que les matériaux utilisés et leurs propriétés, sont répertoriées dans le fichier Excel en annexe.

En ce qui concerne l'étanchéité de l'enveloppe, aucune valeur exacte n'a pu être mesurée mais l'audit a estimé que celle-ci était médiocre. Une valeur de débit de fuite par unité de surface (V_{50}) de 8 m²/h.m² est donc choisie. Il s'agit d'une valeur courante pour des maisons anciennes où aucune précaution particulière concernant l'étanchéité de l'enveloppe n'a été prise. (SPW Énergie, 2021d)

Ouvertures

Les ouvertures de l'habitation reposent principalement sur deux paramètres : le vitrage et le châssis. Trois types de vitrage existent : double vitrage synthétique pour les coupoles, double vitrage normal pour la porte-fenêtre et double vitrage HR pour toutes les autres fenêtres.

L'habitation comporte deux types de châssis : bois pour la porte-fenêtre et PVC pour les autres fenêtres, à l'exception des coupoles qui n'ont pas de châssis.

Pour rappel, les ouvertures sont créées dans le modèle géométrique. Leurs dimensions sont donc directement prises en compte par le logiciel.

Éclairage

Le type d'éclairage des espaces étant peu connu et variable de l'un à l'autre, le template d'éclairage choisi est « DesignBuilder default lighting ». A nouveau, quatre programmes d'éclairage sont définis selon le type d'espace : pièce de vie, chambre, salle de bain ou autre (hall, cave et rangement). Les programmes d'éclairage sont aussi définis selon les habitudes d'occupation des propriétaires ou sur les habitudes générales dans une maison.

HVAC

Le template général choisi est « Radiator heating, Boiler HW, Nat vent » qui correspond assez bien au cas d'étude : pas de ventilation mécanique ou de refroidissement actif, chauffage et production d'ECS au gaz.

Les espaces chauffés sont les pièces de vie, les chambres et la salle de bain. Les pièces utilisées comme rangement ne sont habituellement pas chauffées et les autres espaces (halls et caves) ne contiennent pas de radiateurs. Le programme est généralisé au niveau de l'habitation et correspond aux habitudes de chauffage des propriétaires.

La consommation d'ECS est limitée à la cuisine et à la salle de bain tandis que la ventilation naturelle n'est considérée que pour les pièces avec fenêtre donnant sur l'extérieur.

3.3.2 Calibration et validation

Afin de s'assurer que le modèle réalisé dans DesignBuilder représente le cas réel de manière acceptable, une étape de calibration et de validation est nécessaire. Il s'agit de s'assurer que les résultats issus de la simulation sont suffisamment proches de ceux relevés.

Dans cette étude, la calibration du modèle repose sur un seul paramètre : les consommations annuelles de gaz et d'électricité. En effet, il n'a pas été possible de réaliser des relevés de température sur une période de temps suffisante pour que les résultats soient pertinents. De plus, les propriétaires n'ayant emménagé qu'en fin d'année 2019, seules les consommations d'énergie annuelles entre les printemps 2020 et 2021 peuvent être utilisées. Les relevés effectués sur cette période sont présentés dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Détails des relevés de consommation du cas d'étude

Date de relevé 1	Date de relevé 2	Relevé (kWh)
Consommation de gaz		

18 mars 2020	30 mars 2021	22.147
Consommation d'électricité		
20 avril 2020	30 mars 2021	2.631

Le modèle étant complété et débuggé, la première simulation peut être lancée. L'intervalle de calcul choisi est l'heure puisque que le fichier de données météo le permet et la période de calcul sélectionnée est 01 janvier - 31 décembre 2020, pour deux raisons : être équivalente à une année complète de 365 jours et être au plus proche des périodes des relevés. Comme il n'est possible de sélectionner une période qu'entre le 1 janvier et le 31 décembre d'une même année, c'est l'année 2020 qui est choisie. De cette manière, les conditions météorologiques utilisées par le logiciel correspondent au mieux à celles expérimentées en réalité, dont peuvent fortement dépendre les résultats.

En comparant les premiers résultats de consommation calculés par le logiciel à ceux attendus, on remarque une différence conséquente. Cet écart peut être évalué précisément et confronté à une tolérance fixée pour déterminer si le modèle peut être considéré calibré et être validé.

Il existe principalement deux méthodes de calibration d'un modèle : graphique et statistique. Celle qui a été choisie pour ce travail est la méthode statistique, comme présentée dans la ASHRAE Guideline 14-2002. Deux indices de calibration statistique peuvent être évalués : le MBE - mean bias error et le CV(RMSE) - coefficient of variation (root mean square error). Comme il n'y a qu'un seul paramètre de comparaison, seul le MBE peut être utilisé ici. La tolérance acceptable associé à cet indice, pour un niveau de comparaison annuel et un niveau de détail des données de l'ordre de l'heure, est 10%. (ASHRAE, 2002)

Cette tolérance n'est initialement respectée ni pour la consommation de gaz, ni pour la consommation d'électricité. Le modèle doit donc être affiné afin de rapprocher les résultats calculés des valeurs réelles. Ici, les modifications effectuées portent principalement sur les valeurs laissées par défaut, faute de données réelles à disposition, mais qui semblent pouvoir être rapprochées de la réalité, grâce à des sources de données externes pertinentes.

Les modifications principales effectuées sur le premier modèle concernent les postes suivants :

- Consommation d'ECS (valeurs par défaut fortement sous-évalués)
- Besoins d'éclairage (valeurs par défaut légèrement sous-évaluées)
- Consommation électrique des électroménagers (valeurs non considérées)

La calibration est arrêtée lorsque les exigences sont satisfaites et le modèle est validé. Les résultats finaux obtenus sont présentés dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Résultats de la dernière simulation du modèle calibré

Paramètre	Résultat obtenu (kWh)	Résultat attendu (kWh)	MBE (%)
Gaz			
Chauffage	19 052	-	
Production d'ECS	3 311	-	
Total	22 363	22 147	0,9%
Électricité			
Eclairage intérieur	1 806	-	
Equipements	655	-	
Total	2 461	2 631	6,46

Les deux tolérances d'écart de 10% sont donc bien respectées pour ce modèle final, en particulier pour la consommation de gaz. Le modèle est donc considéré calibré et est validé pour la suite du travail.

Pour des raisons de synthétisation, les encodages présentés à la section précédente et détaillés dans le fichier Excel en annexe sont ceux du modèle final calibré.

3.4 ELABORATION DES SCÉNARIOS DE RÉNOVATION

3.4.1 Choix des variables

Dans le cadre de cette étude, six grands axes de mesures de rénovation sont considérés. Chacun se développe en une ou plusieurs variables, dont les effets sur certains résultats du modèle du cas de base vont être étudiés.

- Isolation des parois
 - Façades
 - Plafond vers combles
 - Plancher sur cave
 - Toitures
- Remplacement des menuiseries
 - Fenêtres
 - Porte-fenêtre
 - Coupoles
- Renforcement de l'étanchéité à l'air
 - Étanchéité
- Amélioration des systèmes
 - Chauffage central
 - Production d'eau chaude sanitaire (ECS)
- Installation d'une ventilation mécanique
 - Ventilation mécanique (VMC)
- Ajout d'énergies renouvelables
 - Panneaux solaires photovoltaïques

Le Tableau 3-5 détaille, pour chaque variable, les sous-variables concrètement étudiées, l'indicateur selon lequel elles sont évaluées, les exigences éventuelles à respecter pour une rénovation de logement. Celles-ci correspondent aux exigences pour les rénovations simples de la réglementation sur la performance énergétique des bâtiments (PEB) en application en Wallonie. (SPW Énergie, 2021d)

Tableau 3-5 : Détail des variables

Variable	Sous-variable	Indicateur	Exigence PEB
Isolation des parois			
Façades Plafond vers combles Plancher sur cave	Matériau isolant : valeur λ	W/mK	U _{max} = 0,24 W/m ² K
Toitures	Mode de pose : épaisseur d'isolant	m	
Remplacement des menuiseries			
Fenêtres et porte-fenêtre	Type de châssis : valeur U _f	W/m ² K	U _w max = 1,50 W/m ² K
	Type de vitrage : valeur U _g	W/m ² K	U _g max = 1,10 W/m ² K
Coupoles	Type de châssis : valeur U _f	W/m ² K	U _g max = 1,40 W/m ² K
	Type de vitrage : valeur U _g	W/m ² K	
Renforcement de l'étanchéité à l'air			
Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration : V ₅₀	m ³ /h.m ²	/
Amélioration des systèmes			
Chauffage central Production d'ECS	Type de générateur : énergie utilisée et CoP	-	Annexe C4 pour les bâtiments existants
Installation d'une ventilation mécanique			
Ventilation mécanique	Type de ventilation mécanique : débits et récupération de chaleur	-	Annexe C2 pour les bâtiments résidentiels
Ajout d'énergies renouvelables			
Panneaux solaires photovoltaïques	Type de panneaux PV : rendement	-	/
	Surface de panneaux PV	m ²	

3.4.2 Collecte des données

Avant de construire les scénarios qui prennent en compte les différentes variables présentées, il faut mettre au point une base de données les concernant. Pour cela, deux types de données sont nécessaires : les propriétés (conductivité, CoP...), définissant la performance des composants, et les coûts (prix par pièce, m²...), déterminant le coût d'investissement.

En ce qui concerne les propriétés de performance, les moyennes fournies par des sources spécialisées dans le domaine de l'énergie et du bâtiment en Wallonie ou en Belgique sont privilégiées (SPW Énergie, Energie Plus Le Site, Livios).

Les coûts moyens des éléments de construction proviennent, eux, du bordereau de prix unitaire 2017 par l'Union Royale Professionnelle d'Architectes (UPA, 2017). Il en est de même pour les autres éléments devant être mis en œuvre simultanément (finition intérieure ou de revêtement de façade lors de l'isolation de parois).

3.4.3 Construction des scénarios

Pour mener cette étude, six scénarios sont construits à partir des différentes variables exposées précédemment. Le premier est un scénario de rénovation de base (R0), s'alignant sur les exigences de la PEB pour la rénovation de logement mais sans impliquer de travaux trop conséquents. Les quatre scénarios suivants sont des scénarios qui repartent du scénario R0 puis se concentrent sur une mesure de rénovation en particulier. Le dernier scénario (R+) est un assemblage des scénarios précédents, s'inspirant des recommandations pour le label Passif rénovation.

Les caractéristiques générales de ces scénarios sont reprises dans le Tableau 3-6. Chacun est détaillé juste ensuite.

Tableau 3-6 : Caractéristiques générales des scénarios

Scénarios	Caractéristiques générales
R0 : Rénovation énergétique de base (inspiration PEB)	<ul style="list-style-type: none">– Isolation minimale du plafond vers combles, des toitures et de la dalle sur cave pour $U=0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$– Étanchéité correcte de l'enveloppe– VMC simple flux, type C
RI : Isolation plus performante	Scénario R0 + <ul style="list-style-type: none">– Toutes les parois isolées, y compris les façades– Isolation vers un niveau $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
RM : Menuiseries plus performantes	Scénario R0 + <ul style="list-style-type: none">– Toutes les menuiseries remplacées– Triple vitrage– Châssis PVC plus performant

RS : Systèmes plus performants	Scénario R0 + <ul style="list-style-type: none"> - Chauffage par pompe à chaleur (PAC) air-eau - Production d'ECS par PAC air-eau et réservoir de stockage
RR : Énergies renouvelables	Scénario R0 + <ul style="list-style-type: none"> - Panneaux solaires photovoltaïques (PV) - Selon la surface de toiture disponible
R+ : Rénovation énergétique complète (inspiration passif)	<ul style="list-style-type: none"> - Isolation poussée de toutes les parois - Triple vitrage et châssis PVC performant pour toutes les menuiseries - Étanchéité élevée de l'enveloppe - Chauffage et production d'ECS par PAC air-eau - VMC double flux, type D - Panneaux solaires photovoltaïques

R0 : Rénovation énergétique de base

Seules les parois pour lesquelles des travaux d'isolation sont les plus aisés sont améliorées : le plafond vers combles, la dalle sur cave, la toiture inclinée et la toiture plate de la salle de bain (celle du salon est déjà partiellement isolée). Les parois sont isolées avec l'épaisseur d'isolant minimale pour répondre à l'exigence $U_{max} = 0,24$ W/m²K de la PEB. Elles sont également isolées de manière à ne pas impacter les volumes intérieurs. Les matériaux et modes de pose sont illustrés dans les détails de parois ci-dessous. Les isolants choisis sont ceux les plus couramment utilisés en rénovation : la laine minérale (LM) pour l'isolation entre pannes, qui a un bon rapport souplesse-efficacité-prix, et le polyuréthane (PUR) pour le reste, de par sa résistance thermique très élevée.

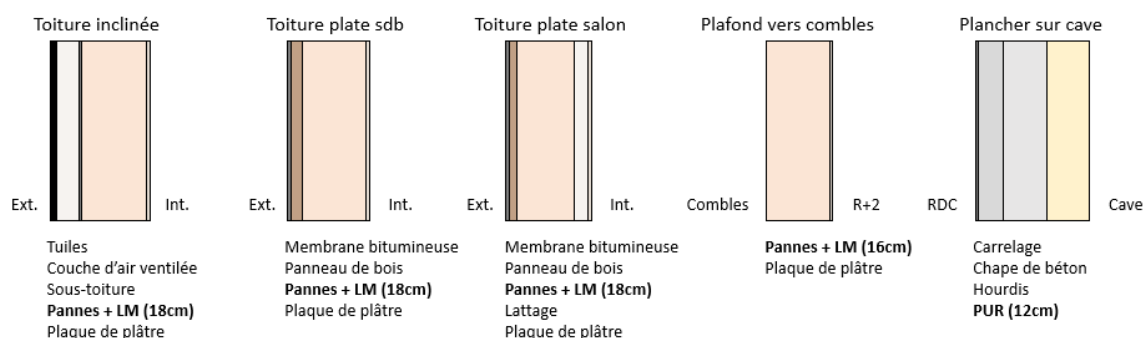


Figure 3-9 : Détails de composition des parois isolées pour le scénario R0

En parallèle des travaux d'isolation, l'étanchéité à l'air de l'enveloppe est retravaillée afin d'atteindre le niveau correct et accessible de $V_{50} = 3$ m³/m³.h.

Dans des travaux de rénovation de base, il est courant de remplacer les menuiseries lorsque le vitrage et/ou les châssis sont peu performants. Dans ce cas d'étude, presque toutes les menuiseries ont été changées en 2013 pour du double

vitrage haut rendement et du châssis PVC. La performance des fenêtres est donc globalement satisfaisante et ne justifie pas un remplacement complet pour une rénovation de base.

De même, la chaudière et le boiler n'étant pas très anciens, il n'est pas indispensable de les échanger avec des systèmes plus performants pour une rénovation énergétique simple.

L'étanchéité et l'isolation de l'enveloppe étant renforcées, il est indispensable de mettre en œuvre une ventilation dans certains locaux pour prévenir les problèmes d'humidité. La ventilation naturelle est donc remplacée par une ventilation mécanique simple flux de type C, avec extraction de l'air vicié des locaux humides (cuisine et salle de bain).

RI : Isolation plus performante

Toutes les parois en contact avec l'extérieur sont isolées et avec un niveau d'isolation qui tend vers $U = 0,015 \text{ W/m}^2\text{K}$. La façade avant, la mansarde et le pignon droit font exception puisqu'elles ne peuvent pas être isolées par l'extérieur. Afin de ne pas nuire à l'esthétique de la façade avant, l'isolation est réalisée par l'intérieur et doit donc être de faible épaisseur afin de limiter l'impact sur les volumes intérieurs. Pour les autres murs de façade, l'isolation est préférentiellement posée par l'extérieur, obligeant à revoir le revêtement. Les matériaux et modes de pose sont illustrés dans les figures ci-dessous.

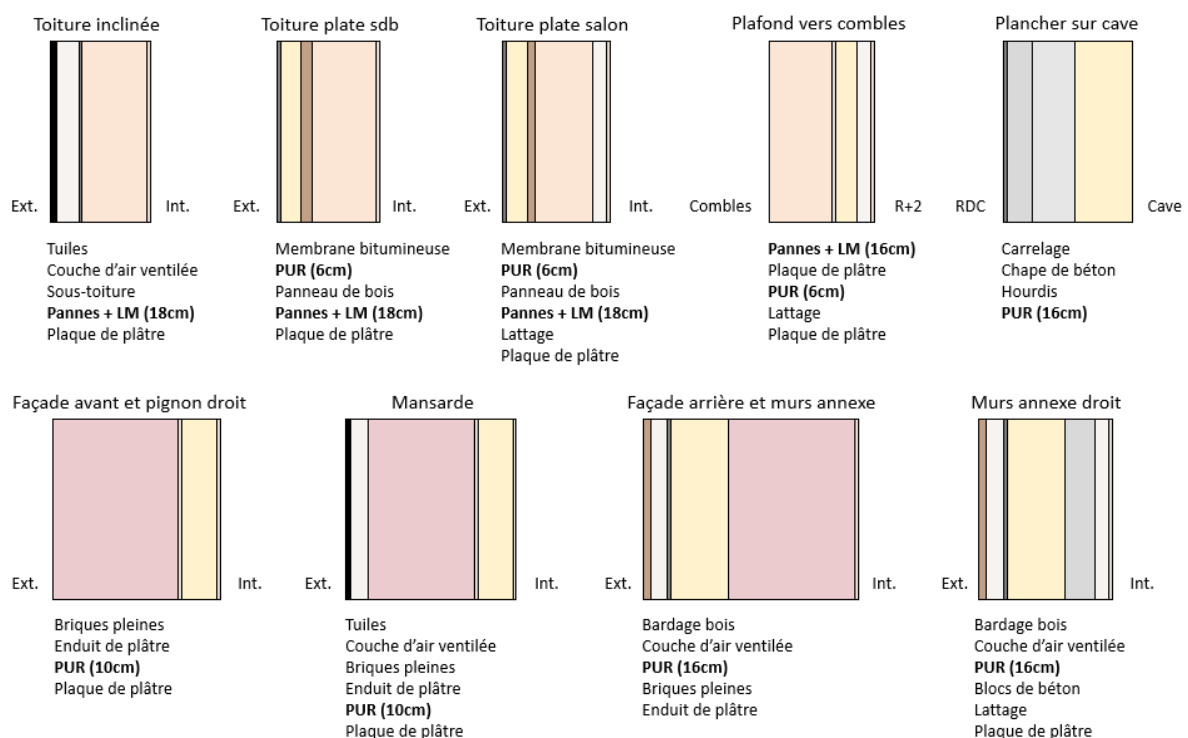


Figure 3-10 : Détails de composition des parois isolées pour le scénario RI

RM : Menuiseries plus performantes

Les fenêtres classiques et la porte-fenêtre sont remplacées pour du triple vitrage (U_g vers $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) et des châssis PVC performant (U_f vers $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$), pour tendre vers un $U_w = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le vitrage synthétique des coupoles devient du triple vitrage également (U_g vers $2 \text{ W/m}^2\text{K}$) pour tendre vers un $U_w = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

RS : Systèmes plus performants

Pour le chauffage et la production d'ECS, la chaudière au gaz et le boiler sont remplacés par une pompe à chaleur air-eau combinée, couplée à la chaudière existante, encore en état. Ainsi, le fonctionnement des systèmes peut être assuré tout au long de l'année.

RR : Énergies renouvelables

Des panneaux solaires photovoltaïques sont ajoutés. La surface de toiture correctement orientée étant limitée ($12,5\text{m}^2$), le dimensionnement des panneaux se fait selon la surface disponible et non pour répondre aux besoins des occupants. Globalement, 4 panneaux de $1\text{m} \times 2\text{m}$ peuvent être installés, pour une superficie totale de 8m^2 . Pour des cellules monocristallines, des rendements de 16 à 20% peuvent être obtenus, correspondant à des puissances de 170 à 200 Wc/m^2 . (Energie Plus Le Site, 2010a)

RT : Rénovation énergétique poussée

Les précédentes configurations sont combinées pour former un scénario s'approchant des critères du label Passif rénovation. A ces caractéristiques s'ajoutent une étanchéité de l'enveloppe poussée vers un $V50 = 1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ et une ventilation mécanique à double flux, donc de type D. L'extraction d'air vicié des locaux humides (cuisine et salle de bain) est toujours assurée mécaniquement mais l'entrée d'air frais dans les autres locaux l'est également. De plus, une récupération de chaleur dans l'air vicié, à température ambiante intérieure, est effectuée.

L'objectif est d'étudier le cas de la rénovation la plus complète et performante qui continue à respecter le budget alloué de 60.000€ .

3.4.4 Budgétisation des scénarios

Pour rappel, un budget maximal de 60.000€ est défini pour tous les scénarios. Ce budget fait échos à la limite des prêts à taux zéro qu'il est possible de contracter auprès de la Région wallonne pour rénover son habitation. Il est donc nécessaire, en cours de construction des scénarios, de vérifier que cette limite est toujours respectée. L'attention est portée particulièrement sur le dernier scénario, qui est le plus complet.

La méthodologie exacte du calcul des coûts d'investissement est décrite à la section 3.6.5 mais les résultats des différents scénarios sont déjà présentés dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7 : Détails des coûts d'investissement des scénarios

Scénario	Coût d'investissement total (€)
R0	8.850
RI	22.391
RM	25.900
RS	20.722
RR	15.024
R+	59.916

3.5 MODÉLISATION DES SCÉNARIOS DE RÉNOVATION

3.5.1 Paramétrage

Une fois les scénarios de rénovation construits, ceux-ci peuvent être modélisés dans DesignBuilder. Le principe est de repartir pour chacun des modèles du cas de base et de modifier le paramétrage du modèle de base pour créer les nouveaux modèles. Les nouveaux paramètres encodés sont présentés dans les tableaux qui suivent.

A nouveau, les encodages réalisés sont aussi détaillés dans des fichiers Excel. Il en existe trois : un pour les scénarios R0 et R+, qui concernent plusieurs axes de rénovation, et un pour les quatre autres scénarios, dans lesquels un seul axe intervient.

R0 : Scénario de rénovation de base

Tableau 3-8 : Détails du scénario R0 en modification du CB

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Isolation des parois			
Plancher sur cave	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	Guide pratique pour rénover (SPW Énergie, 2016a)
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plancher 0,12 m	
Plafond vers combles Toitures	Matériau isolant → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
Renforcement de l'étanchéité à l'air			

Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration → V_{50}	3 m ³ /h.m ²	Guide PEB (SPW Énergie, 2021d)
Installation d'une ventilation mécanique			
Ventilation mécanique	Type de ventilation mécanique → Débit d'extraction cuisine → Débit d'extraction sdb → Récupération de chaleur	Type C 75m ³ /h 50m ³ /h Non	Guide PEB (SPW Énergie, 2021d)

RI : Isolation plus performante

Tableau 3-9 : Détails du scénario RI en modification du scénario R0

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Isolation des parois			
Façade avant Mansarde Pignon droit	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	Guide pratique pour rénover (SPW Énergie, 2016a)
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Intérieur 0,10 m	
Façade arrière Façades annexe	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,16 m	
Plafond vers combles	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plafond 0,06 m	
Plancher sur cave	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plancher 0,16 m	
Toiture inclinée	Matériau isolant → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	

	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
Toiture plate sdb	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,6 m	
Toiture plate salon	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,6 m	

RM : Menuiseries plus performantes

Tableau 3-10 : Détails du scénario RM en modification du scénario R0

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Remplacement des menuiseries			
Fenêtres Porte-fenêtre	Type de châssis → Valeur U_f	PVC 1,2 W/m ² K	Propriétés de châssis (Livios, 2017)
	Type de vitrage → Valeur U_g → Coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS)	Triple BE ⁶ 0,6 W/m ² K 0,6	Propriétés de vitrages (Energie Plus Le Site, 2007d)

RS : Systèmes plus performants

Tableau 3-11 : Détails du scénario RS en modification du scénario R0

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Amélioration des systèmes			

⁶ Basse émissivité et gaz isolant

Chauffage central et production d'ECS	Type de générateur → Énergie utilisée → CoP	PAC air-eau Électricité 3,5	Pompes à chaleur (Energie Plus Le Site, 2007c)
---------------------------------------	---	-----------------------------------	---

RR : Énergies renouvelables

Tableau 3-12 : Détails du scénario RR en modification du scénario R0

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Ajout d'énergies renouvelables			
Panneaux solaires photovoltaïques	Type de panneaux PV → Rendement	Monocristallins 0,18	Rendement des cellules PV (Energie Plus Le Site, 2010b)
	Surface de panneaux PV	8 m ²	

R+ : Rénovation énergétique poussée

Tableau 3-13 : Détails du scénario R+ en modification du CB

Variable	Sous-variable	Valeur	Source
Isolation des parois			
Façade avant Mansarde Pignon droit	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	Guide pratique pour rénover (SPW Énergie, 2016a)
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Intérieur 0,10 m	
Façade arrière Façades annexe	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,16 m	
Plafond vers combles	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plafond 0,06 m	
Plancher sur cave	Matériau isolant	PUR 0,025 W/mK	

	→ Valeur λ		
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plancher 0,16 m	
Toiture inclinée	Matériau isolant → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
Toiture plate sdb	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes 0,18 m	
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,6 m	
Toiture plate salon	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK	
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,6 m	
Remplacement des menuiseries			
Fenêtres Porte-fenêtre	Type de châssis → Valeur U_f	PVC 1,2 W/m ² K	Propriétés de châssis (Livios, 2017)
	Type de vitrage → Valeur U_g → Coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS)	Triple BE ⁷ 0,6 W/m ² K 0,6	Propriétés de vitrages (Energie Plus Le Site, 2007d)
Coupoles	Type de vitrage → Valeur U_g → Coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS)	Triple synth. 2,2 W/m ² K 0,8	
Renforcement de l'étanchéité à l'air			
Étanchéité à l'air	Taux d'infiltration → V_{50}	1 m ³ /h.m ²	Projet de référence

⁷ Basse émissivité et gaz isolant

			(Energie Plus Le Site, 2018)
Amélioration des systèmes			
Chauffage central et production d'ECS	Type de générateur → Énergie utilisée → CoP	PAC air-eau Électricité 3,5	Pompes à chaleur (Energie Plus Le Site, 2007c)
Installation d'une ventilation mécanique			
Ventilation mécanique	Type de ventilation mécanique → Débit d'extraction cuisine → Débit d'extraction sdb → Débit des autres espaces → Récupération de chaleur	Type D 75m ³ 25m ³ Par surface Oui	-
Ajout d'énergies renouvelables			
Panneaux solaires photovoltaïques	Type de panneaux PV → Rendement	Monocristallins 0,18	Rendement des cellules PV (Energie Plus Le Site, 2010a)
	Surface de panneaux PV	8 m ²	

3.5.2 Étude de sensibilité

Pour la construction des scénarios, il a fallu associer aux différentes sous-variables des valeurs précises. Certaines propriétés (valeurs U, CoP, rendement) sont des valeurs moyennes choisies au sein d'intervalles trouvés dans la littérature et dépendent du choix de produit réel. D'autres (épaisseurs) ont été fixées « arbitrairement » et dépendent des exigences à respecter ou des objectifs visés. Ces valeurs peuvent donc varier et il est intéressant d'en observer les effets sur les paramètres de sortie étudiés.

Pour cela, une étude de sensibilité est menée sur les quatre scénarios intermédiaires et une de leurs sous-variables :

- RI Épaisseur d'isolant des quatre types de parois
- RM Valeurs U des châssis et vitrages
- RS CoP de la PAC
- RR Rendement des panneaux

Le détail des variations effectuées est présenté dans le Tableau 3-14.

Pour ces quatre scénarios, deux configurations, en plus de la principale présentée précédemment, sont donc lancées en simulation : une défavorable (-) et une favorable (+). Les résultats de ces configurations sont également exposés dans le prochain chapitre. L'intérêt de cette étude de sensibilité est de connaître l'intervalle de résultats potentiels mais aussi d'évaluer la sensibilité des paramètres de sortie aux variables étudiées. Plus la relation d'influence est forte, moins les résultats peuvent être considérés comme généralistes.

Tableau 3-14 : Détail de l'étude de sensibilité

Variable	Sous-variable	Intervalle de valeur
RI Isolation		
Façades	Matériau isolant	PUR
	Valeur λ	0,025 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,14 - 0,20 m
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Intérieur 0,08 - 0,12 m
Plafond vers combles	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes Contrainte
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plafond 0,04 - 0,10 m
Plancher sur cave	Matériau isolant → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Sous plancher 0,14 - 0,20 m
Toitures	Matériau isolant 1 → Valeur λ	Laine minérale 0,035 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Entre pannes Contrainte
	Matériau isolant 2 → Valeur λ	PUR 0,025 W/mK
	Mode de pose → Épaisseur d'isolant	Extérieur 0,04 - 0,10 m
RM Menuiseries		
Fenêtres Porte-fenêtre	Type de châssis	PVC
	→ Valeur U_f	0,8 - 1,5 W/m²K
	Type de vitrage	Triple BE ⁸ - Double HR ⁹

⁸ Basse émissivité

⁹ Haut rendement

	→ Valeur U_g → Coefficient de gain de chaleur solaire (CGCS)	0,5 - 1,1 W/m²K 0,6
Coupoles	Type de vitrage → Valeur U_g	Triple synthétique 1,8 - 2,5 W/m²K
RS Systèmes		
Chauffage central et production d'ECS	Type de générateur → Énergie utilisée → CoP	PAC air-eau Électricité 3 - 4
RR Énergies renouvelables		
Panneaux solaires photovoltaïques	Type de panneaux PV → Rendement	Poly ou monocristallins 0,16 - 0,20
	Surface de panneaux PV	Contrainte

3.6 TRAITEMENT DES DONNÉES

3.6.1 Choix des paramètres étudiés

Des nombreux résultats fournis par les scénarios modélisés, quatre thèmes sont choisis pour être étudiés, représenté chacun par un paramètre spécifique :

- Performance énergétique
 - o Consommation d'énergie
- Impacts environnementaux
 - o Émissions de carbone
- Confort
 - o Confort thermique
- Coûts
 - o Coûts d'investissement
 - o Coûts d'utilisation

Le choix d'étudier les consommations énergétiques est assez évident lorsqu'il s'agit d'opération de rénovation énergétique. Celui d'évaluer l'émission de CO₂ fait écho à l'étude du futur du monde de l'énergie en introduction. D'un côté, la préoccupation grandissante pour la préservation de l'environnement amène à vouloir réduire, à son niveau, la production de gaz à effet de serre. D'un autre côté, l'éventuelle application future d'une taxe carbone en Belgique, pénalisant financièrement les logements énergivores, encourage à explorer un scénario où des économies sur le long terme pourraient également passer par cet aspect. En ce qui concerne le confort thermique, l'objectif est surtout de s'assurer que, suite à l'application des mesures de rénovation, le confort d'hiver s'améliore mais également que celui d'été ne se dégrade pas trop. Enfin, l'étude des coûts, sur une

période donnée, répond à l'intérêt évident et compréhensible des particuliers pour les économies qu'ils pourraient réaliser sur le long terme grâce à un projet de rénovation. L'aspect financier est un argument de poids lors des discussions entre conseillers en énergie et particuliers.

Le Tableau 3-15 détaille, pour chaque paramètre, les sous-paramètres concrètement étudiés, l'indicateur et la source de données pour les évaluer, ainsi que le standard éventuel auquel ils peuvent être comparés.

Tableau 3-15 : Détail des paramètres étudiés

Paramètre	Sous-paramètre	Indicateur	Source
Consommation d'énergie	Consommation totale d'énergie annuelle (gaz, électricité, PAC ou totale)	kWh/an	E+/DB ¹⁰
	Consommation spécifique d'énergie annuelle	kWh/m ² .an	
Emissions de CO ₂	Emissions de CO ₂ annuelles (gaz, électricité, PAC ou totales)	kg CO ₂ /an	E+/DB Facteurs de conversion (Energie Plus Le Site, 2007b)
	Emissions spécifiques de CO ₂ annuelles	kg CO ₂ /m ² .an	
Confort thermique	Température opérative moyenne (en hiver et en été)	°C	E+/DB
	Heures de surchauffe	h/an	E+/DB Ambiance thermique NBN EN ISO 7730 (Energie Plus Le Site, 2014)
Coût d'investissement	Coût d'investissement (fournitures, mise en œuvre, frais de projet)	€	Prix unitaires (UPA, 2017)
Coûts d'utilisation	Coût de maintenance et de remplacement	€	Prix unitaires (UPA, 2017)
	Coût de fonctionnement (énergies : gaz et électricité)	€	Prix de l'énergie (CREG, 2021)
	Coût d'une éventuelle tarification carbone	€	Prix du carbone (Climat, 2018)

3.6.2 Consommation d'énergie

Les données concernant les consommations d'énergie sont directement obtenues après simulation dans Design Builder. Celles-ci correspondent à l'énergie

¹⁰ Energy+ via DesignBuilder

utilisée et facturée aux propriétaires, à ne pas confondre avec l'énergie primaire consommée. Les catégories de données, intéressantes dans cette étude, sont :

- Consommation totale d'énergie annuelle
- Consommation de gaz annuelle (chauffage, production d'ECS)
- Consommation d'électricité annuelle (éclairage et équipements ainsi que chauffage et production d'ECS dans le cas d'une PAC)
- Production d'électricité annuelle (grâce à des panneaux solaires PV)

Pour chaque catégorie, les résultats peuvent être présentés sous forme de consommation totale annuelle en kWh/an ou de consommation spécifique annuelle (divisée par la surface de plancher chauffée) en kWh/m².an.

3.6.3 Émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ étudiées ici sont celles dues à la consommation d'énergie fossile (électricité, gaz). Les scénarios sont en effet composés avec l'objectif de comparer l'impact des mesures sur la performance énergétique du logement et non l'aspect environnemental des matériaux utilisés.

Ce type d'émission est facilement évalué à partir des résultats de consommation puisqu'il suffit de les multiplier par un facteur en kg CO₂/kWh lié au type de combustible. Les valeurs utilisées dans ce travail sont les suivantes :

- Gaz naturel : **0,198 kg CO₂/kWh**
- Électricité : **0,290 kg CO₂/kWh**
- Électricité pour les PAC : **0,347 kg CO₂/kWh**

(Energie Plus Le Site, 2007b)

Les émissions annuelles sont exprimées en kg CO₂/an et les émissions spécifiques annuelles (divisées par la surface de plancher chauffée), en kg CO₂/m².an. (Wagelmans et al., 2015) Aucune exigence ou recommandation à ce niveau n'est encore indiquée à ce jour. A l'avenir, il se pourrait qu'une taxe carbone soit appliquée et que les émissions aient alors un impact financier pour les propriétaires. Ce cas est exploré dans l'analyse des coûts des scénarios.

3.6.4 Confort thermique

La norme NBN EN ISO 7730, concernant l'ambiance thermique, peut être traduite par les objectifs de température opérative suivants (pour un bâtiment d'habitation et selon le type de pièce) :

- Minimum pour le chauffage en saison hivernale : 18, 20 ou 21°C
- Maximum pour le rafraîchissement en saison estivale : 27, 26 ou 25.5°C

(Energie Plus Le Site, 2014)

Dans cette étude, les températures minimales et maximales de référence choisies sont **18°C** et **25°C**. Elles peuvent ainsi être comparées aux températures

opératives moyennes et extrêmes en saison estivale (juin-juillet-août) ou hivernale (décembre-janvier-février) obtenues pour chaque scénario.

La valeur maximale permet également d'évaluer le nombre d'heures de surchauffe par an (h/an) ou le pourcentage de temps de surchauffe sur l'année (%) où la température moyenne intérieure est supérieure à 25°C. La PEB recommande de ne pas dépasser **5%** de temps de surchauffe. (Guide Bâtiment Durable, 2020)

3.6.5 Coûts

Cette étude basique des coûts s'intéresse aux quatre types qui impactent le plus le portefeuille des propriétaires : investissement (fournitures, mise en œuvre et frais annexes), fonctionnement (énergies : gaz et électricité), maintenance/remplacement et tarification carbone éventuelle.

Afin d'analyser les effets économiques à long terme, les coûts sont étudiés sur une période de **30 ans**, durée maximale du crédit pour le prêt à taux zéro. Il est, en effet, intéressant de constater l'état de la situation économique au bout de cette période. (Liège-Énergie, s. d.-b) Les coûts de fin de vie (démolition, déconstruction) ne sont donc pas comptabilisés, estimant que ceux-ci n'incomberont pas aux propriétaires initiateurs des travaux.

Les différentes données pour cette étude des coûts sont voulues antérieures à l'année 2020, début de la crise sanitaire Covid-19. Puisque nous ne savons pas quel sera l'impact à long terme de cet événement, en particulier sur les coûts de l'énergie, il est choisi de ne pas prendre en compte ses effets actuels.

Tous les détails de l'étude sont repris dans le fichier Excel dédié à l'analyse des résultats en annexe.

Coût d'investissement

Le coût d'investissement rassemble le prix des fournitures, le coût de leur mise en œuvre ainsi que les principaux frais inhérents à un projet de rénovation. La première étape du calcul est donc de réaliser un métré des différents scénarios. Chaque type d'élément est mesuré selon une unité permettant d'évaluer son coût par après.

Ensuite, les coûts moyens par unité (€/pièce, m²...), pose comprise, des composants sont recherchés dans le Bordereau de prix unitaire 2017 de l'UPA (2017) et comparé aux valeurs fournies par des sources spécialisées (Energie Plus Le Site, Livios, Guide Rénovation...). Pour un intervalle de valeur donné, c'est la valeur centrale qui est choisie par défaut. Le dossier (audit, devis, rapport de travaux) du projet de rénovation qui est réellement mis en œuvre fournit également des informations précieuses qui peuvent guider le choix de certains prix. Les mêmes règles s'appliquent aux autres éléments devant être mis en œuvre simultanément (finition intérieure ou revêtement de façade lors de l'isolation de parois).

Pour finir, certains frais inhérents à un projet de rénovation doivent également être considérés. Les plus importants sont ceux liés aux services d'un architecte et d'un auditeur. Les autres frais éventuels sont négligés. Le bordereau des prix

unitaires (UPA, 2017) évaluent le prix d'un architecte pour une transformation de 10 à 14% du coût total du projet et d'un auditeur à un forfait de 600 à 900€. Des moyennes de prix sont donc fixées à **12%** pour un architecte et **750€** pour un auditeur.

Tous les prix mentionnés ci-dessus sont fournis hors TVA. Si l'habitation est un logement privé avec au minimum 10 ans d'ancienneté, comme c'est le cas ici, la TVA s'élève à 6%. Autrement, la TVA reste à 21%. (SPF Finances, 2015) Ce travail, qui se consacre aux logements privés et anciens, se permet de considérer le taux réduit de TVA de **6%**.

Pour terminer, les coûts d'investissement constituent une dépense ponctuelle et non étalée dans le temps. Puisqu'il est impossible de savoir en quelle année serait effectuée cette dépense ou d'étudier le cas de chaque année, l'évolution de ces prix n'est pas prise en compte.

Coût de maintenance et remplacement

Sur une période de vie d'un bâtiment, d'autres coûts s'ajoutent aux coûts de l'énergie : ceux de maintenance des équipements et de remplacement des éléments arrivés en fin de vie.

Le Tableau 3-16 répertorie les différents types d'éléments de construction, leur durée de vie, l'intervalle éventuel d'entretien ou contrôle à effectuer par un professionnel ainsi que la source des coûts utilisés. Les durées de vie sont celles prises en compte par TOTEM, outil d'étude des coûts sur le cycle de vie. (TOTEM, 2020)

Tableau 3-16 : Données de maintenance et remplacement des éléments de construction

Equipement	Durée de vie	Coûts de remplacement	Entretien professionnel	Coûts d'entretien
Isolants	>60 ans	-	/	-
Menuiseries	40 ans - châssis 30 ans - vitrage	-	/	-
Chaudière au gaz	20 ans	Bordereau des prix unitaire (UPA, 2017)	1x / 2 ans (obligatoire)	(Comparateur Energie, 2020)
Boiler	20 ans		/	-
PAC air-eau	15 ans		1x / 2 ans (recommandé)	(Guide Pompe à Chaleur, 2014)
VMC	15 ans - système 25 ans - distribution		1x / 3 ans (recommandé)	(Ventilation.be, s. d.)
Panneaux PV	30 ans - panneaux 10 ans - onduleur		1x / 2 ans (recommandé)	(Engie, 2019)

Coût de fonctionnement

Les coûts de fonctionnement de l'habitation, évalués annuellement, correspondent aux coûts liés à la consommation d'énergie (gaz et électricité dans ce cas-ci). Le site Energie Commune réalise un observatoire mensuel des prix de l'énergie (gaz naturel, mazout et électricité) pour les trois régions belges depuis 2010. Les valeurs moyennes mensuelles sont présentées dans la Figure 3-11.

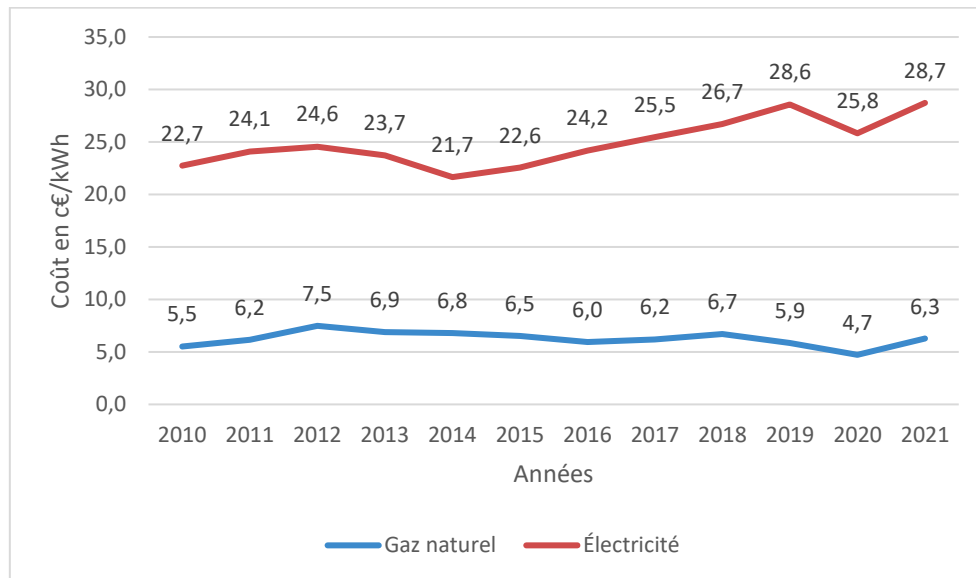


Figure 3-11 : Évolution des prix de l'énergie en Wallonie entre 2010 et 2021, sur base des données d'Energie Commune (2021)

La chute des prix en 2020 due à la crise du covid-19 est bien visible sur le graphique. Mais les prix semblent revenir, en 2021, au niveau de ceux de 2019. Les valeurs de base choisies pour cette étude sont donc celles de 2019, année la plus récente non impactée par la situation sanitaire, soit **5,9 c€/kWh** pour le gaz et **28,6 c€/kWh** pour l'électricité (prix TVAC).

Pour prévoir l'évolution de ces coûts dans les années à venir, l'évolution entre 2010 et 2019 est prise comme référence. Par moyenne des évolutions des prix pour chaque année, l'évolution annuelle est estimée à **101,2%** pour le gaz et **102,7%** pour l'électricité. Autrement dit, le prix du gaz est supposé augmenter chaque année de 1,2% et celui de l'électricité de 2,7%.

Il suffit alors de multiplier les résultats de consommation obtenus dans DesignBuilder (kWh/an) par le prix de l'énergie correspondant (€/kWh) et ajusté selon la période étudiée, pour obtenir les coûts liés à l'utilisation du bâtiment (€) sur cette période.

L'évolution des coûts de l'énergie étant tout de même une hypothèse très incertaine, deux configurations sont envisagées : une idéaliste, qui ne tient pas compte d'une évolution et reprend les prix de 2019, et une sécuritaire, qui considère l'évolution ascendante continue sur 30 ans déterminée ci-dessus. Le coût réel a alors de grandes chances de se trouver entre les deux valeurs évaluées.

Coût d'une tarification carbone

A l'occasion du Débat national sur la tarification du carbone, tenu en 2018, la mise en œuvre d'une tarification en Belgique a été discutée. Trois trajectoires de prix ont été proposées : le prix augmenterait graduellement de 10€/t CO₂ en 2020 à 40, 70 ou 100€/t CO₂ en 2030. (Climat, 2018) Si cette tarification n'est pas encore d'application, le cas de figure où elle le serait dans les années à venir est envisagé pour chaque scénario, en tenant compte, comme recommandé, de l'option de trajectoire intermédiaire de **10€/t CO₂** au départ et **70€/t CO₂** après 10 ans.

4 RÉSULTATS

La méthodologie décrite au chapitre précédent a permis de récolter l'ensemble des résultats attendus, qu'il ne tient plus qu'analyser.

Dans ce quatrième chapitre, les résultats obtenus sont présentés et analysés en trois phases. Pour commencer, les résultats sont détaillés pour le cas de base et chacun des scénarios individuellement. Par la suite, les résultats principaux sont comparés et analysés pour l'ensemble des configurations. Pour finir, des conclusions sont tirées de ces analyses, permettant de répondre aux questions de recherche exposées au début de ce travail.

4.1 CAS DE BASE

Pour rappel, le cas de base correspond à l'habitation dans son état existant, avant tout projet de rénovation. Les résultats qui y sont liés sont utilisés comme référence pour l'analyse des résultats issus des scénarios étudiés.

4.1.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le cas de base s'élève à **24.822 kWh/an**. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **153 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-1, le total comprend une consommation de gaz, pour le chauffage et la production d'ECS, de 22.362 kWh/an (90%) et une consommation d'électricité, pour l'éclairage et les équipements, de 2.460 kWh/an (10%).

La consommation de gaz, en plus d'avoir une grande importance dans la consommation totale, est fortement sensible aux variations de température extérieure, comme le témoigne la Figure 4-2. La plage de valeur est de moins de 400 kWh pour un mois d'été à presque 4.000 kWh pour un mois d'hiver. Cela est principalement dû au niveau d'isolation extrêmement faible de l'habitation, qui permet des échanges de chaleur par les parois conséquents.

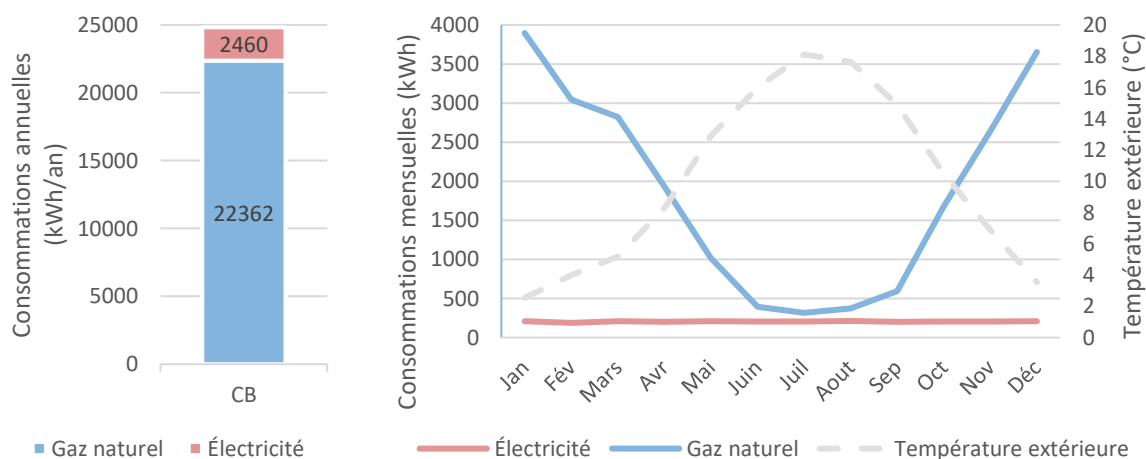


Figure 4-1 (gauche) : CB - Consommations d'énergie annuelles
 Figure 4-2 (droite) : CB - Consommations d'énergie mensuelles

4.1.2 Émissions de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le cas de base sont de **5.141 kg CO₂/an**. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **32 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-3, le total comprend des émissions pour le gaz consommé de 4.428 kg CO₂/an (86%) et des émissions pour l'électricité consommée de 713 kg CO₂/an (14%). Le ratio gaz-électricité diffère de celui des consommations (90-10%) puisque la production d'électricité produit plus de carbone que celle du gaz.

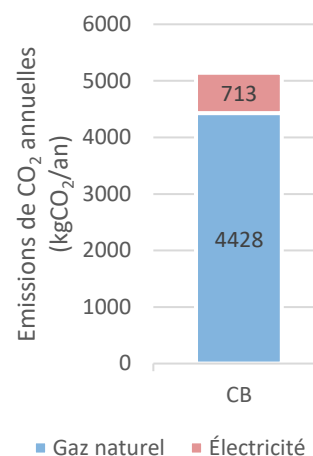
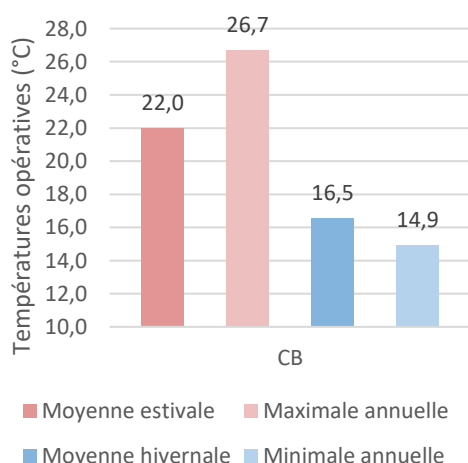


Figure 4-3 : CB - Émissions de CO₂ annuelles

4.1.3 Confort thermique



La Figure 4-4 présente les températures opératives évaluées pour le cas d'étude. En été, la moyenne des températures de **22,0°C** se trouve sous les 25°C, seuil supérieur de confort thermique. Même si la température maximale de 26,7°C est au-dessus, une surchauffe n'est constatée que pour 65h/an. Cela équivaut à **0,7%** du temps, ce qui est bien inférieur à 5%, comme recommandé. En hiver, la moyenne des températures s'élève à **16,5°C** et la température minimale à 14,9°C. Ces deux valeurs sont donc sous le seuil inférieur de confort thermique fixé à 18°C.

Figure 4-4 : CB - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.1.4 Coûts sur le cycle de vie

Le coût total sur 30 ans comprend l'investissement initial, les coûts de maintenance et remplacement et les coûts de fonctionnement (énergie) sur cette période. Il exclut donc une hypothétique taxe carbone (TC). Comme représenté à la Figure 4-5, il est, pour le cas de base, de **65.438€** en ne tenant pas compte d'une évolution du prix de l'énergie (prix de 2019) et de **83.949€** en considérant l'évolution évaluée précédemment.

La Figure 4-6 détaille les types de coûts, également calculés sur 30 ans. L'investissement pour le cas de base est évidemment nul. Les coûts de maintenance

et remplacement, 4.750€, ne représentent que 7% (sans évolution)/5% (avec évolution) du total. Le reste est composé des coûts de fonctionnement, 60.688€/79.198€, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela correspond à des factures énergétiques annuelles moyennes de 2.023€/2.640€. La taxe carbone, selon le barème fixé, s'élèverait à 14.961€.

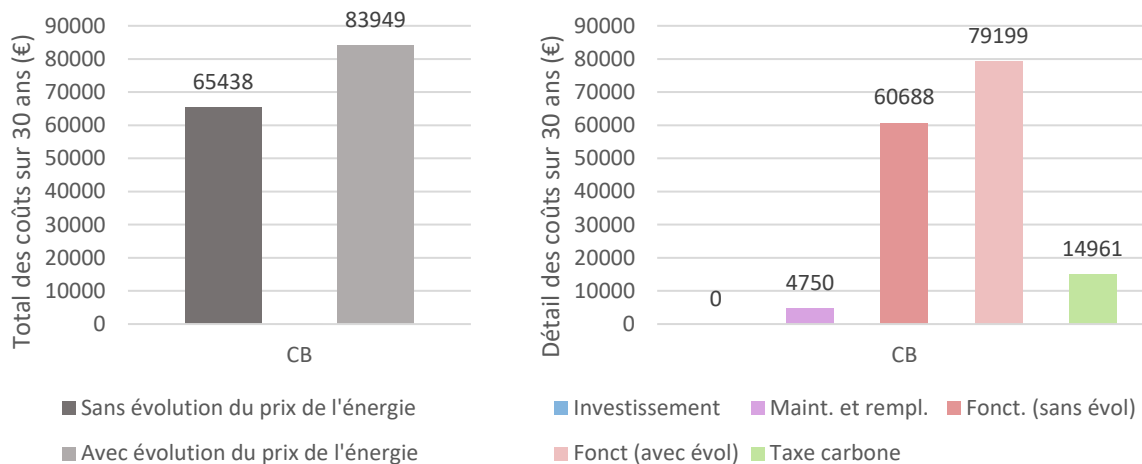


Figure 4-5 (gauche) : CB - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

Figure 4-6 (droite) : CB - Coûts détaillés sur 30 ans

La répartition des coûts de fonctionnement, visible à la Figure 4-7, est de 65-35% pour le gaz et l'électricité si aucune évolution des prix n'est considérée. Avec évolution, la part de l'électricité, plus chère que le gaz, grandit de 5%.

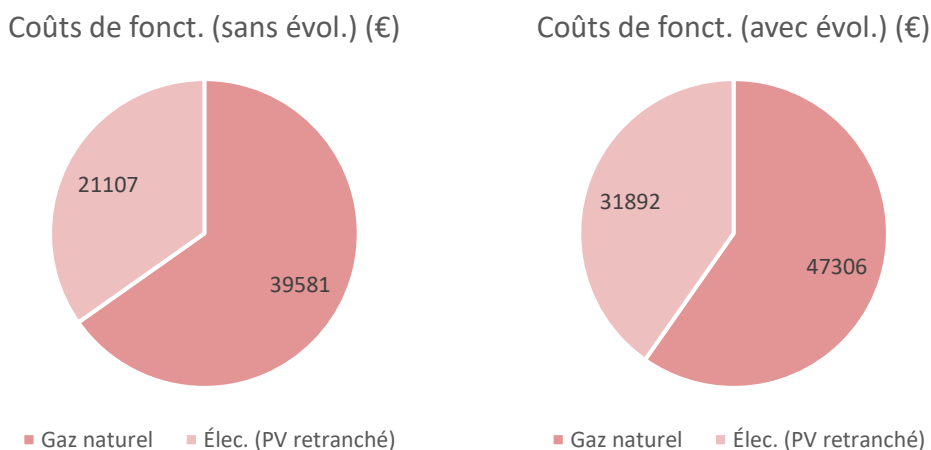


Figure 4-7 : CB - Répartitions des coûts de fonctionnement

4.2 SCÉNARIO R0

Pour rappel, le scénario R0 correspond à une rénovation simple, tentant de satisfaire les exigences PEB mais sans exiger de travaux trop importants. Les caractéristiques principales sont une isolation basique de certaines parois, une étanchéité améliorée et l'installation d'une VMC simple flux.

4.2.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario R0 s'élève à **22.157 kWh/an**, soit **11%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **137 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-8, le total comprend une consommation de gaz de 19.697 kWh/an, soit une réduction de 12% par rapport à CB et une consommation d'électricité, identique, de 2.460 kWh/an.

Les effets des mesures de rénovation incluses dans ce scénario sur les consommations d'énergie sont donc assez réduits. De plus les effets varient en même temps que la température extérieure. De presque nulle en été, la diminution de consommation peut monter jusqu'à 400 kWh pour un mois d'hiver, comme illustré sur la Figure 4-9.

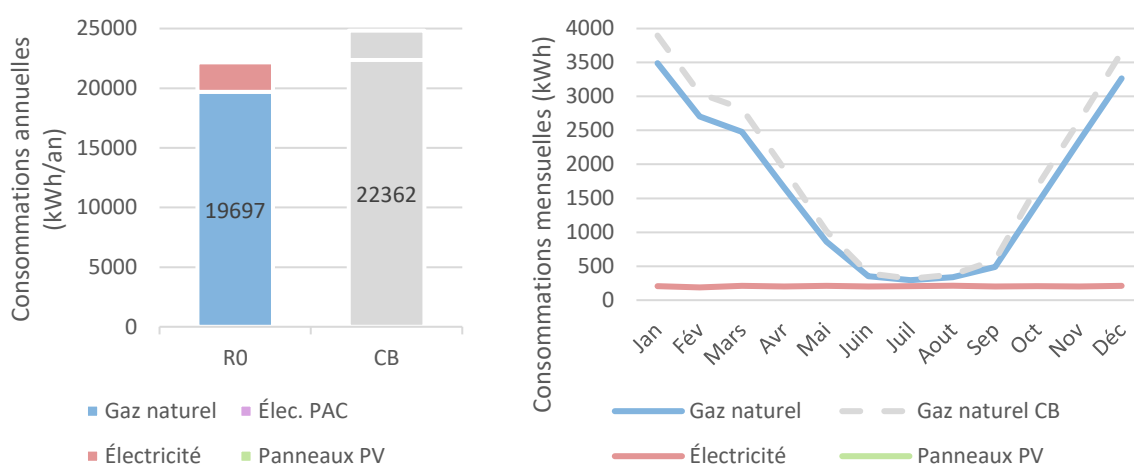


Figure 4-8 (gauche) : R0 - Consommations d'énergie annuelles

Figure 4-9 (droite) : R0 - Consommations d'énergie mensuelles

4.2.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario R0 sont de **4.613kg CO₂/an**, c'est-à-dire **10%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **28 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-10, le total comprend des émissions pour le gaz consommé de 3.900 kg CO₂/an, soit une diminution de 12% par rapport à CB, et des émissions pour l'électricité consommée, identiques, de 713 kg CO₂/an.

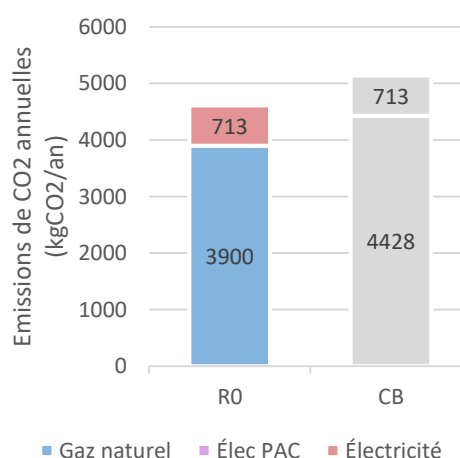


Figure 4-10 : R0 - Émissions de CO₂ annuelles

4.2.3 Confort thermique

La Figure 4-11 présente les températures opératives évaluées pour le scénario R0. En été, la moyenne des températures, **22,2°C**, a légèrement augmenté par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 25,9°C, a par contre diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 30h/an, moins de la moitié du temps de CB. Cela équivaut à **0,3%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **18,2°C**, et la température minimale, 17,1°C, ont fort augmenté par rapport à CB. Si la deuxième est toujours sous les 18°C, la première est passée au-dessus du seuil.

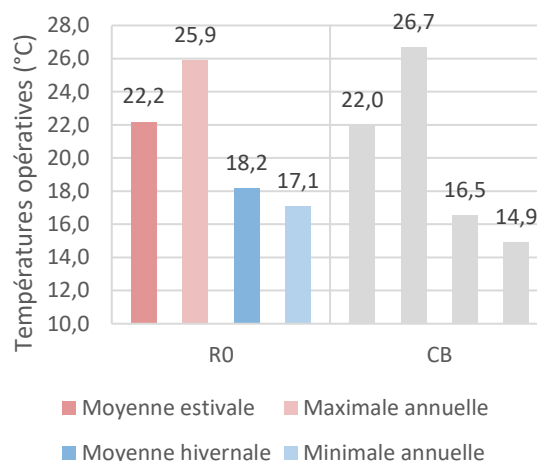


Figure 4-11 : R0 - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.2.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la Figure 4-12, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario R0, de **73.571€/91.161€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient à une **augmentation de 12/9%** par rapport à CB.

La Figure 4-13 détaille les types de coût, également calculés sur 30 ans. L'investissement est évalué à 8.850€ et les coûts de maintenance et remplacement à 8.750€. Les coûts de fonctionnement, prédominants, s'élèvent à 55.971€/73.561€, sans/avec évolution. Cela équivaut à un gain par rapport à CB de 4.717€/5.638€ sur 30 ans ou de 157€/188€ par an en moyenne.

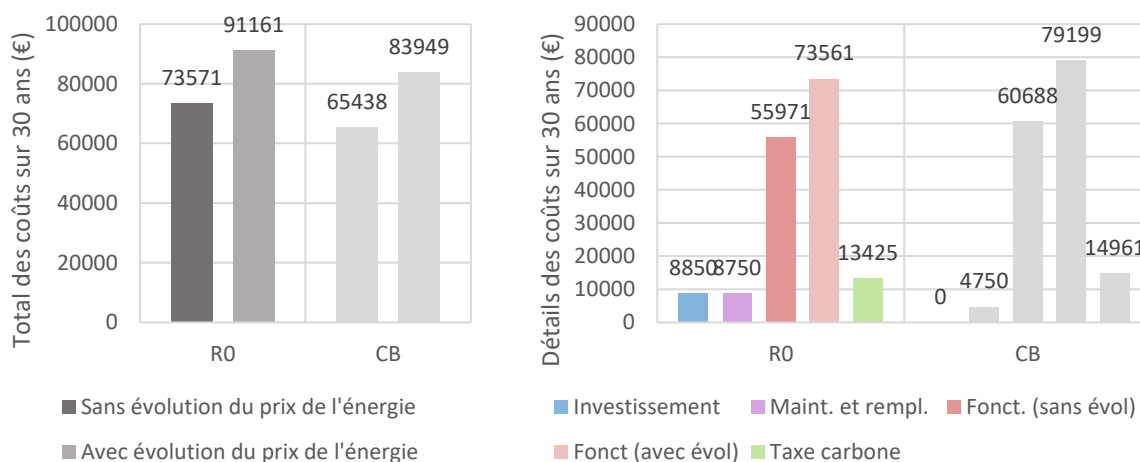


Figure 4-12 (gauche) : R0 - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

Figure 4-13 (droite) : R0 - Coûts détaillés sur 30 ans

La taxe carbone s'élèverait à 13.425€. Cela correspond à un gain potentiel de 1.536€/30 ans, ou de 51€/an en moyenne, par rapport à CB.

Ces deux gains ne permettent pas de récupérer l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (12.850€). Après 30 ans, il reste, pour le gain sur l'énergie seul, un déficit de 8.133€/7.212€ et, pour les deux gains combinés, un déficit de 6.597€/5.676€.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-14, montre que l'isolation constitue plus de la moitié du total et la VMC près d'un tiers. Le reste part en frais de projet.

Coûts d'investissement TVAC (€)

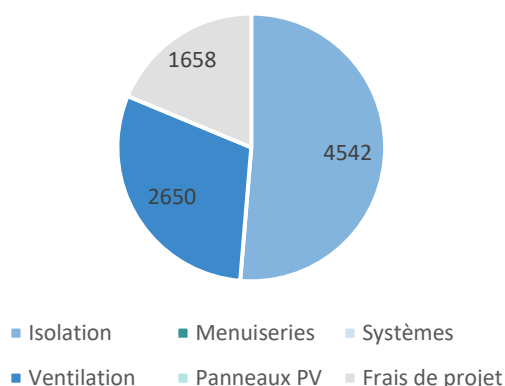


Figure 4-14 : R0 - Répartition des coûts d'investissement

4.3 SCÉNARIO RI

Pour rappel, le scénario RI correspond à R0 avec une isolation plus poussée de l'enveloppe. Toutes les parois qui composent le volume protégé sont isolées et les épaisseurs sont généralement suffisantes pour tendre vers un $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

4.3.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario RI s'élève à **8.053 kWh/an**, soit **68%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **50 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-15, le total comprend une consommation de gaz de 5.593 kWh/an, soit une réduction de 76% par rapport à CB et une consommation d'électricité, identique, de 2.460 kWh/an.

La réduction de consommation de gaz dans ce scénario est donc phénoménale. L'effet est surtout perçu en saison froide puisque c'est à ce moment-là que l'isolation ajoutée est la plus performante. Lors d'un mois d'hiver, moins de 1000 kWh de gaz sont consommés, contre presque 4000 kWh pour CB (voir Figure 4-16).

En ce qui concerne la sensibilité des résultats, la Figure 4-15 démontre qu'une variation d'épaisseur des matériaux isolants (± 2 à 4cm pour toutes les parois, soit ± 20 à 25%) n'a pas une grande influence sur le résultat. La consommation de gaz ne fluctue par rapport à RI que de +4% pour RI- (isolants moins épais) et -5% pour RI+ (isolants plus épais). Le choix d'épaisseurs précises pour caractériser le scénario principal n'est donc pas critique quant aux résultats de consommation d'énergie.

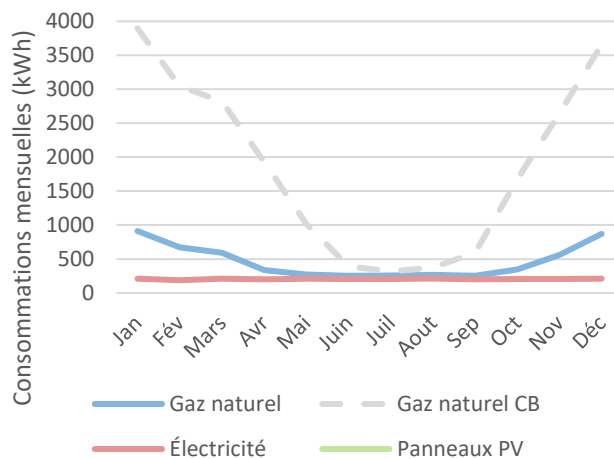
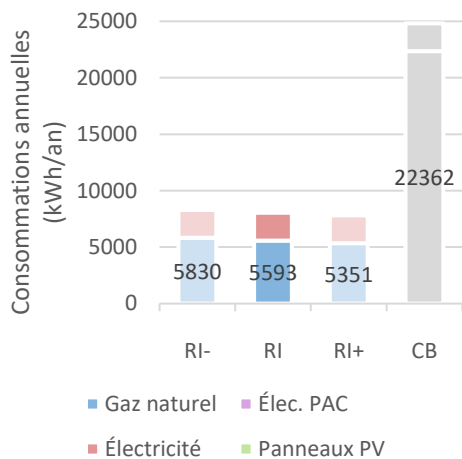


Figure 4-15 (gauche) : RI - Consommations d'énergie annuelles
 Figure 4-16 (droite) : RI - Consommations d'énergie mensuelles

4.3.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario RI sont de **1.820 kg CO₂/an**, c'est-à-dire **65%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **11 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-17, le total comprend des émissions pour le gaz consommé de 1.107 kg CO₂/an, soit une diminution de 75% par rapport à CB, et des émissions pour l'électricité consommée, identique, de 713 kg CO₂/an.

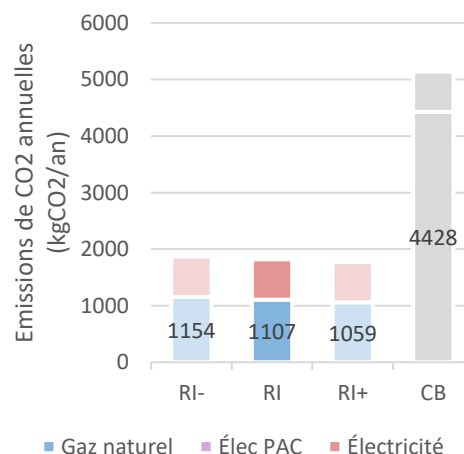


Figure 4-17 : RI - Émissions de CO₂ annuelles

4.3.3 Confort thermique

La Figure 4-18 présente les températures opératives évaluées pour le scénario RI. En été, la moyenne des températures, **23,4°C**, a augmenté de plus d'un degré par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 26,0°C, a par contre légèrement diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 59h/an, temps légèrement inférieur à celui de CB. Cela équivaut à **0,7%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **19,5°C**, et la température minimale, 18,5°C, ont fortement augmenté par rapport à CB. Les deux sont d'ailleurs passées au-dessus de 18°C.

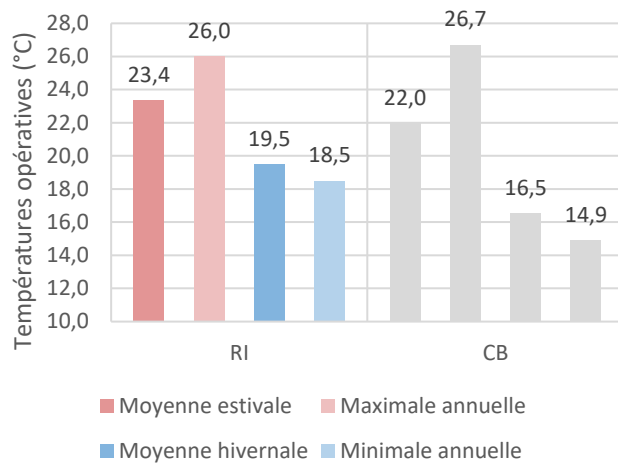


Figure 4-18 : RI - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.3.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la Figure 4-19, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario RI, de **62.148€/74.865€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient à une **diminution de 5%/12%** par rapport à CB.

La sensibilité de ces résultats, sans ou avec évolution du prix de l'énergie, est toujours faible puisque ceux-ci ne varient que d'environ 1% autour de RI, que ce soit pour RI- ou RI+.

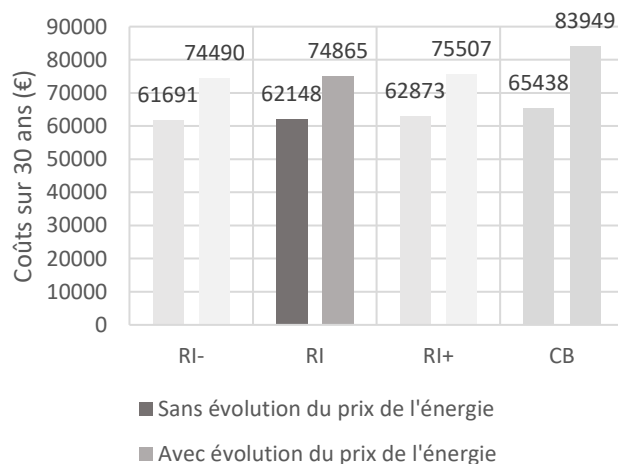


Figure 4-19 : RI - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

La Figure 4-20 détaille les types de coût, également calculés sur 30 ans. L'investissement, devenu significatif, est évalué à 22.391€ et les coûts de maintenance et remplacement à 8.750€. Les coûts de fonctionnement, moins dominants, s'élèvent à 31.006€/43.723€, sans/avec évolution. Cela équivaut à un gain important par rapport à CB de 29.682€/35.476€ sur 30 ans ou de 989€/1.183€ par an en moyenne. La taxe carbone serait, elle, de 5.298€. Cela correspond à un gain potentiel de 9663€/30 ans, ou de 322€/an en moyenne, par rapport à CB.

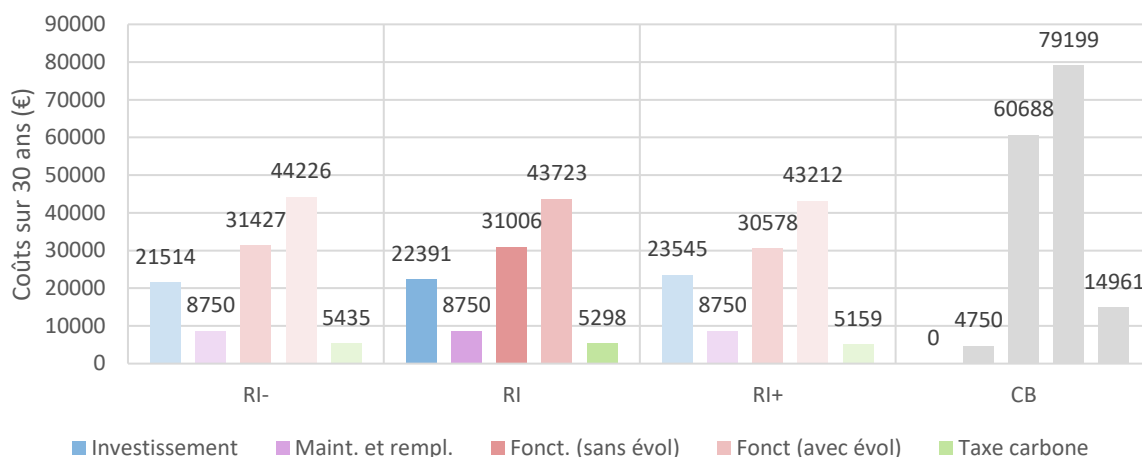


Figure 4-20 : RI - Coûts détaillés sur 30 ans

Ces gains permettent de récupérer l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (26.391€). Après 30 ans, il apparaît, pour le gain sur l'énergie seul, un bénéfice de 3.291€/9.085€ et, pour les deux gains combinés, un bénéfice de 12.953€/18.748€.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-21, montre que l'isolation est maintenant responsable de presque 75% des coûts. Le quart restant est réparti entre VMC et frais de projet.

Coûts d'investissement TVAC (€)

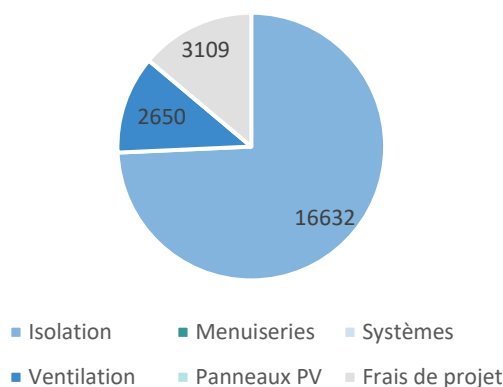


Figure 4-21 : RI - Répartition des coûts d'investissement

4.4 SCÉNARIO RM

Pour rappel, le scénario RM correspond à R0 avec un remplacement des menuiseries par des châssis et des vitrages plus performants

4.4.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario RM s'élève à **20.045 kWh/an**, soit **19%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **124 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-22, le total comprend une consommation de gaz de 17.585 kWh/an, soit une réduction de 21% par rapport à CB, et une consommation d'électricité, identique, de 2.460 kWh/an.

La diminution de la consommation de gaz pour ce scénario est donc modérée et, comme pour l'isolation, l'effet se ressent davantage en saison froide (voir Figure 4-23). Quant à la sensibilité du résultat, la Figure 4-22 établit qu'une variation de

valeur U des éléments de menuiserie de ± 20 à 40% n'a pas une grande influence sur la consommation de gaz. Celle-ci ne diverge de celle de RM que de +4% pour RM- (menuiseries moins performantes) et -2% pour RM+ (menuiseries plus performantes). Le choix des valeurs exactes pour caractériser le scénario principal n'est donc pas de nature à trop fausser les résultats de consommation d'énergie.

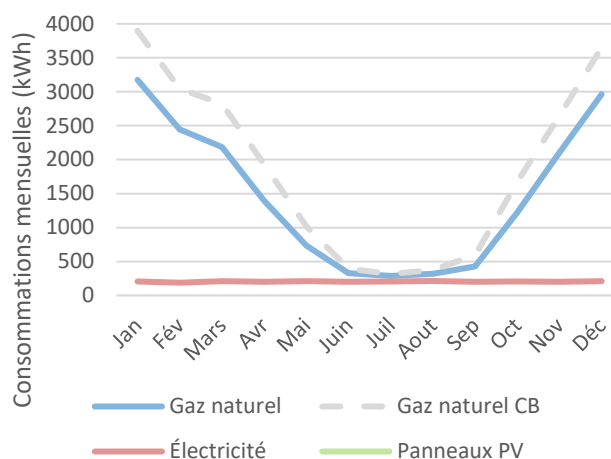
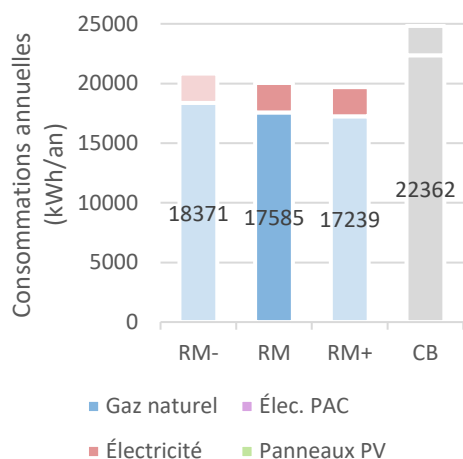


Figure 4-22 (gauche) : RM - Consommations d'énergie annuelles

Figure 4-23 (droite) : RM - Consommations d'énergie mensuelles

4.4.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario RM sont de **4.195 kg CO₂/an**, c'est-à-dire **18%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **26 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-24, le total comprend des émissions pour le gaz consommé de 3.482 kg CO₂/an, soit une diminution de 21% par rapport à CB, et des émissions pour l'électricité consommée, identique, de 713 kg CO₂/an.

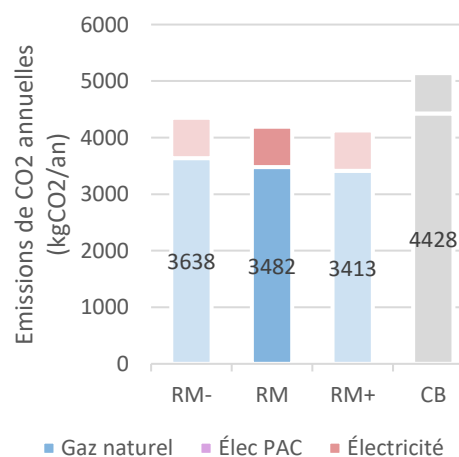


Figure 4-24 : RM - Émissions de CO₂ annuelles

4.4.3 Confort thermique

La Figure 4-25 présente les températures opératives évaluées pour le scénario RM. En été, la moyenne des températures, **22,5°C**, a augmenté d'un demi degré par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 26,2°C, a par contre légèrement diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 44h/an, soit deux tiers du temps de CB. Cela équivaut à **0,5%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **18,3°C**, et la température minimale, 17,2°C, ont fortement augmenté par rapport à CB. Si la deuxième est toujours sous les 18°C, la première est passée au-dessus.

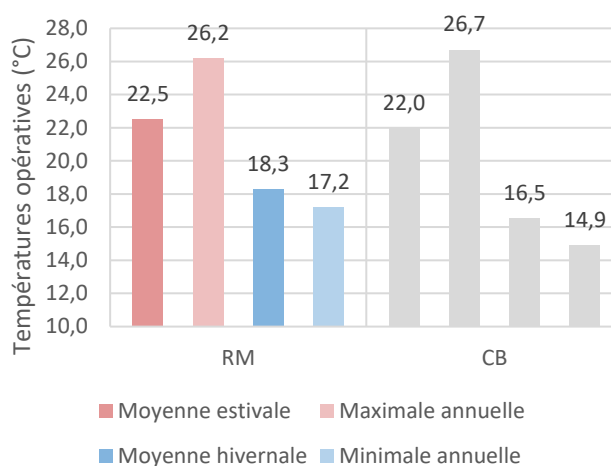


Figure 4-25 : RM - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.4.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la Figure 4-26, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario RM, de **86.883€/103.743€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient à une **augmentation de 33%/24%** par rapport à CB.

La sensibilité de ces résultats, sans ou avec évolution du prix de l'énergie, est toujours faible puisque ceux-ci ne varient que d'environ 1% autour de RM, que ce soit pour RM- ou RM+.

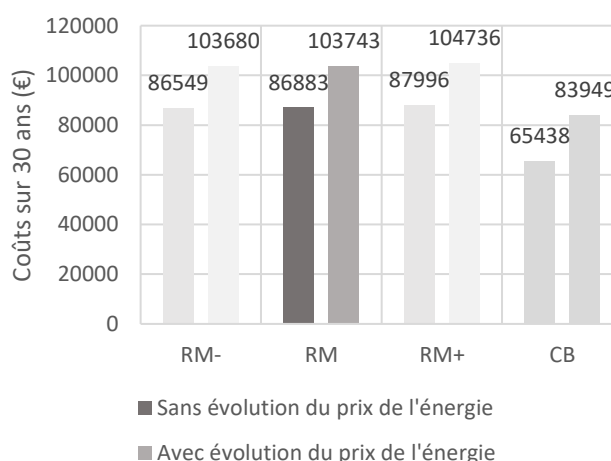


Figure 4-26 : RM - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

La Figure 4-27 détaille les types de coût, également calculés sur 30 ans. L'investissement, devenu significatif, est évalué à 25.900€ et les coûts de maintenance et remplacement à 8.750€. Les coûts de fonctionnement, toujours dominants, s'élèvent à 51.233€/69.093€, sans/avec évolution. Cela équivaut à un gain modéré par rapport à CB de 8.455€/10.106€ sur 30 ans ou de 282€/337€ par an en moyenne. La taxe carbone serait, elle, de 12.208€. Cela correspond à un gain potentiel de 2.752€/30 ans, ou de 92€/an en moyenne, par rapport à CB.

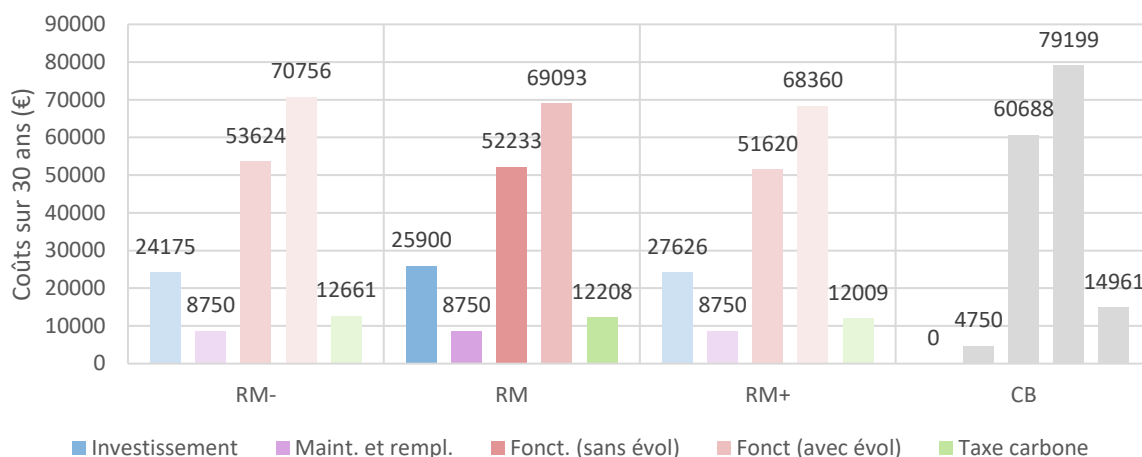


Figure 4-27: RM - Coûts détaillés sur 30 ans

Ces deux gains ne permettent pas de récupérer l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (29.900€). Après 30 ans, il reste, pour le gain sur l'énergie seul, un déficit de 21.445€/19.794€ et, pour les deux gains combinés, un déficit de 18.693€/17.042€.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-28, montre que les menuiseries constituent plus de la moitié du total. Le reste se répartit entre isolation, VMC et frais de projet.

Coûts d'investissement TVAC (€)

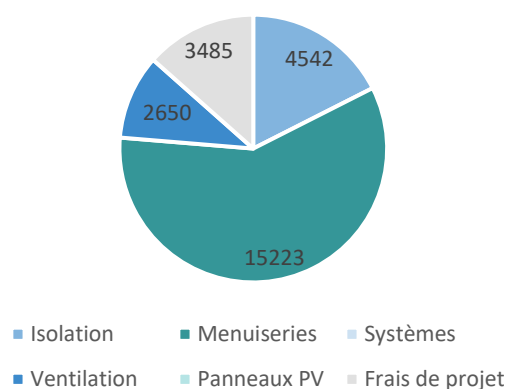


Figure 4-28 : RM - Répartition des coûts d'investissement

4.5 SCÉNARIO RS

Pour rappel, le scénario RS correspond au scénario R0 avec le remplacement de la chaudière et du boiler par une PAC air-eau.

4.5.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario RS s'élève à **7.246 kWh/an**, soit **71%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **45 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-29, le total comprend une consommation d'électricité par la PAC de 4.786 kWh/an, soit une réduction de 79% par rapport à CB, et d'électricité pour le reste, identique, de 2.460 kWh/an.

La consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'ECS (ici, électricité via une PAC) est donc drastiquement réduite par rapport à celle de CB (gaz). La Figure 4-30 montre qu'elle l'est même sur toute l'année, puisqu'en été la

consommation approche zéro. La consommation d'électricité pour l'éclairage et les équipements prend d'autant plus d'importance dans la consommation totale (environ 50%).

Concernant la sensibilité du résultat, la variation de la performance de la PAC ($\pm 0,5$ pour la CoP, soit $\pm 30\%$) a un impact modéré sur la consommation d'électricité de cette dernière. D'après la Figure 4-29, le résultat varie de +17% pour RS- (CoP plus faible) et -13% pour R+ (CoP plus haute). Le choix d'une valeur exacte parmi un rang de valeurs moyennes a donc ici une influence certaine sur le résultat donné par le scénario principal, qui est donc à considérer avec précautions.

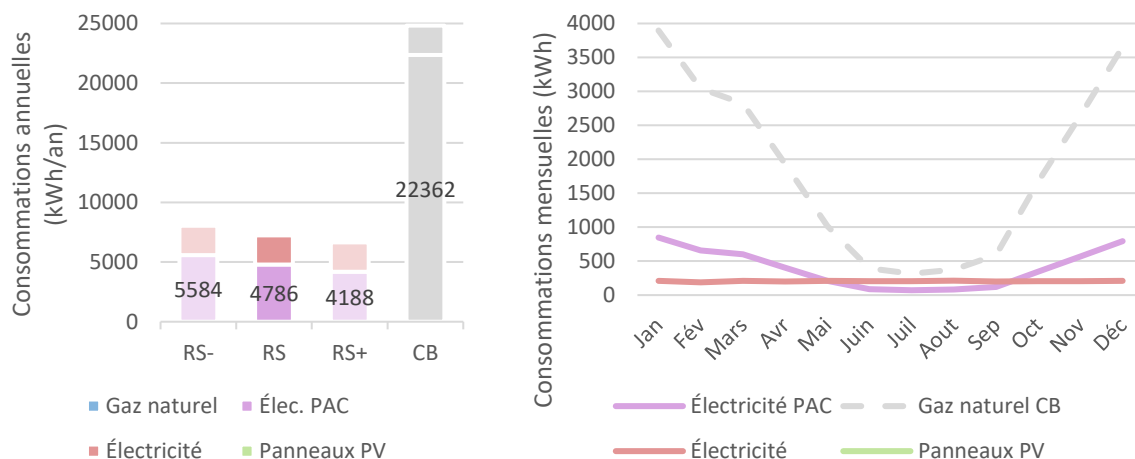


Figure 4-29 (gauche) : RS - Consommations d'énergie annuelles

Figure 4-30 (droite) : RS - Consommations d'énergie mensuelles

4.5.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario RS sont de **2.374 kg CO₂/an**, c'est-à-dire **54%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffé de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **15 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-31, le total comprend des émissions pour l'électricité consommée par la PAC de 1.661 kg CO₂/an, soit une diminution de 62% par rapport au gaz de CB, et des émissions pour le reste de l'électricité consommée, identique, de 713 kg CO₂/an. Cette moindre diminution des émissions par rapport aux consommations est due au facteur de conversion de l'électricité pour PAC, bien plus haut que celui du gaz.

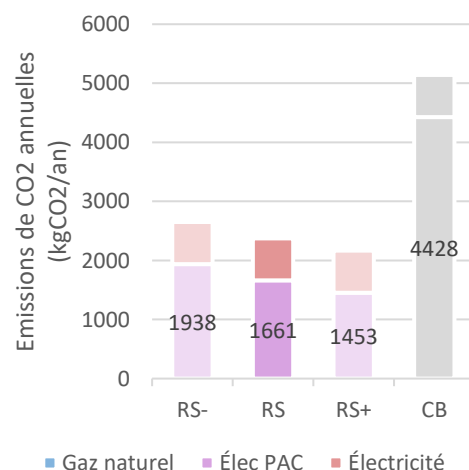


Figure 4-31 : RS - Émissions de CO₂ annuelles

4.5.3 Confort thermique

La Figure 4-32 présente les températures opératives évaluées pour le scénario RS. En été, la moyenne des températures, **22,2°C**, a faiblement augmenté par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 25,9°C, a par contre légèrement diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 30h/an, moins de la moitié du temps de CB. Cela équivaut à **0,3%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **18,2°C**, et la température minimale, 17,1°C, ont fortement augmenté par rapport à CB. Si la deuxième est toujours sous les 18°C, la première est passée au-dessus.

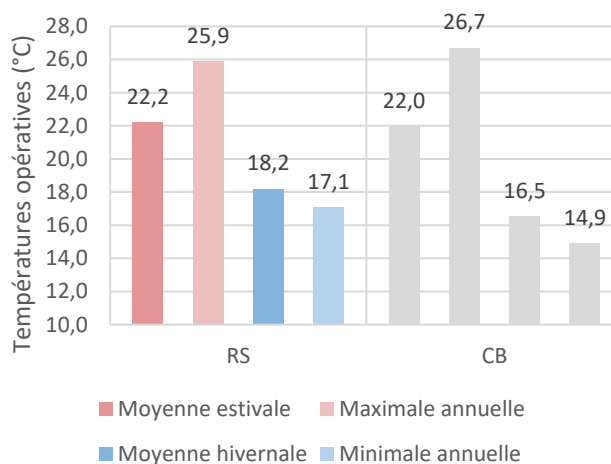


Figure 4-32 : RS - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.5.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la Figure 4-33, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario RS, de **98.146€/129.915€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient à une **augmentation de 50%/55%** par rapport à CB.

La sensibilité de ces résultats, sans ou avec évolution du prix de l'énergie, est plus significative ici puisque ceux-ci varient de +7% pour RS- et -3% pour RS+.

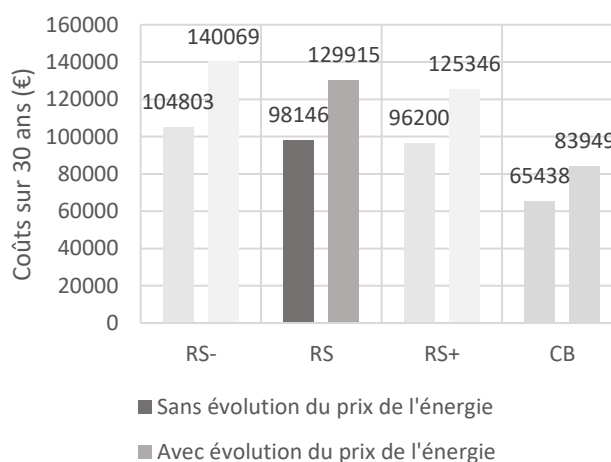


Figure 4-33 : RS - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

La Figure 4-34 détaille les types de coût, également calculés sur 30 ans. L'investissement, devenu significatif, est évalué à 20.722€ et les coûts de maintenance et remplacement à 15.250€. Les coûts de fonctionnement, extrêmement dominants, s'élèvent à 62.173€/93.943€, sans/avec évolution. Cela équivaut à une **perte** par rapport à CB de 1.485€/14.744€ sur 30 ans ou de 50€/491€ par an en moyenne. La taxe carbone serait, elle, de 6.909€. Cela correspond à un gain potentiel de 8.052€/30 ans, ou de 268€/an en moyenne, par rapport à CB.

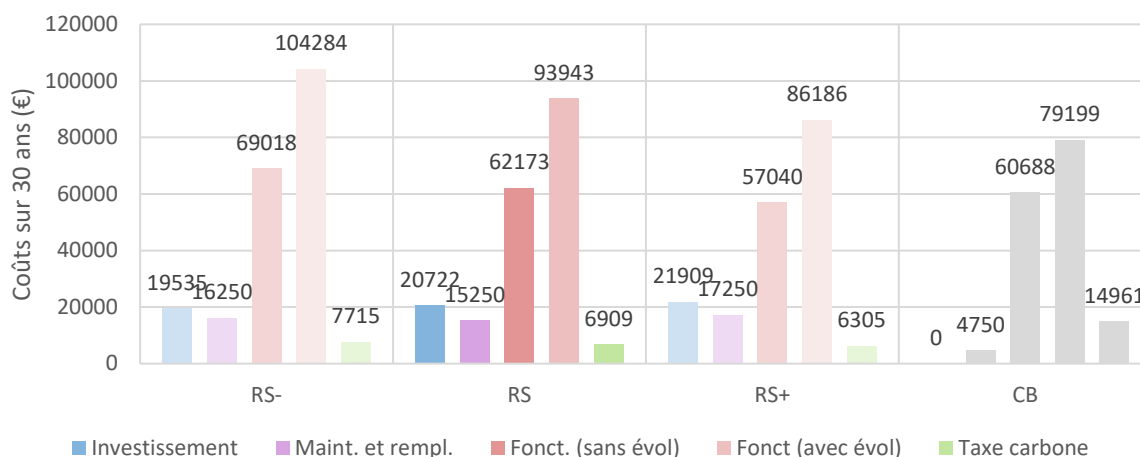


Figure 4-34 : RS - Coûts détaillés sur 30 ans

Pour RS, il est impossible de récupérer un jour l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (31.222€) grâce à une économie d'énergie puisqu'il y a perte par rapport au cas de base. Seule la configuration « RS+ et sans évolution » permet un léger gain à ce niveau-là : 3.648€/30 ans, soit 122€/an.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-35, montre que les systèmes de chauffe constituent plus de la moitié du total. Le reste se répartit entre isolation, VMC et frais de projet.

Coûts d'investissement TVAC (€)

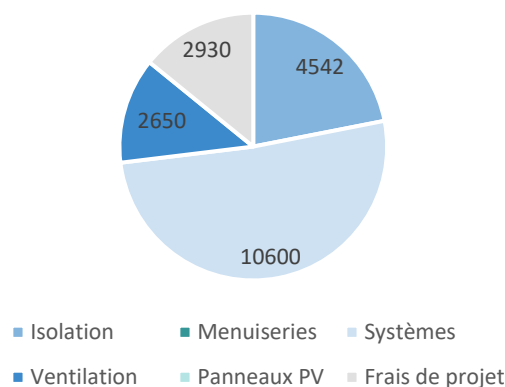


Figure 4-35 : RS - Répartition des coûts d'investissement

4.6 SCÉNARIO RR

Pour rappel, le scénario RR correspond à R0 avec l'ajout de 8m² de panneaux solaires photovoltaïques en toiture.

4.6.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario RR s'élève à **20.647 kWh/an**, soit **17%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **127 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-36, le total comprend une consommation de gaz de 19.708 kWh/an, soit une réduction de 12% par rapport à CB, et une consommation d'électricité de 938 kWh/an. Cette réduction de 62% par rapport à CB est due à une production de 1.522 kWh/an par les panneaux PV.

L'impact des mesures de ce scénario n'est donc pas très remarquable si seule la consommation totale est observée. Mais il peut en être autrement pour d'autres paramètres. De plus, les gains en énergie solaire sont principalement perçus en saison estivale, lorsque l'ensoleillement est plus important (voir Figure 4-37).

Pour ce qui est de la sensibilité des résultats à la caractérisation du scénario, le seul impacté ici est la consommation d'électricité, retranchée de l'électricité générée par les panneaux. La Figure 4-36 montre que le choix d'une valeur pour le rendement parmi un intervalle de valeurs courantes ($\pm 0,02$ autour de 0,18, donc $\pm 11\%$ autour de la valeur centrale) induit une variation de la consommation totale d'électricité de +18% pour RR- (moins bon rendement) et de -18% pour RR+ (meilleur rendement). La sensibilité du résultat est donc remarquable à l'échelle de la consommation d'électricité mais diminue considérablement si la consommation totale est considérée.

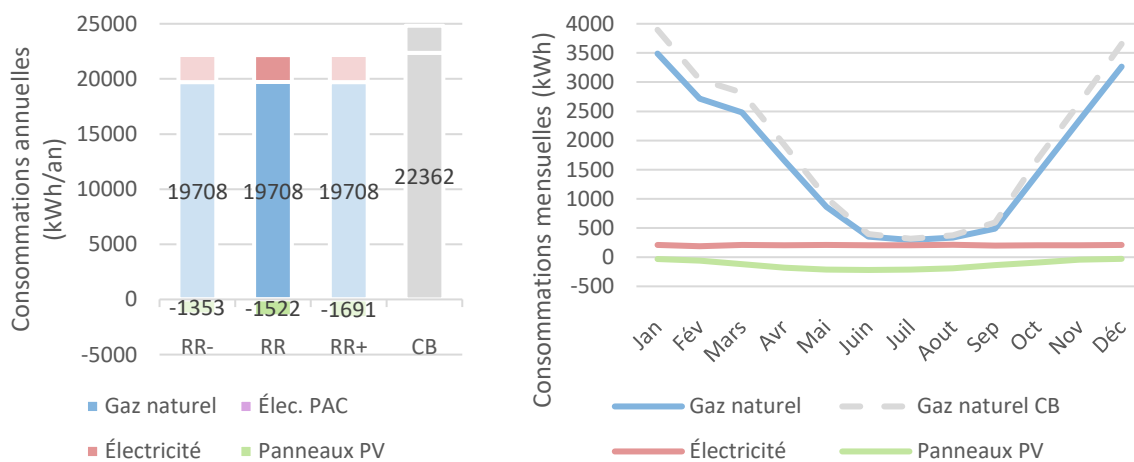


Figure 4-36 (gauche) : RR - Consommations d'énergie annuelles

Figure 4-37 (droite) : RR - Consommations d'énergie mensuelles

4.6.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario RR sont de **4.147 kg CO₂/an**, c'est-à-dire **19%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffé de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **26 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-38, le total comprend des émissions pour le gaz consommé de 3.902 kg CO₂/an, soit une diminution de 12% par rapport à CB, et des émissions pour l'électricité consommée de 272 kg CO₂/an, 62% de moins que CB.

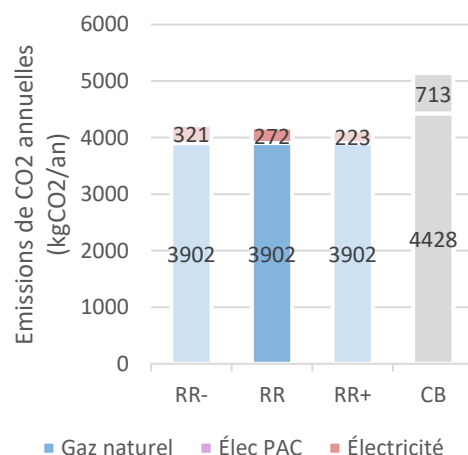


Figure 4-38 : RR - Émissions de CO₂ annuelles

4.6.3 Confort thermique

La Figure 4-39 présente les températures opératives évaluées pour le scénario RR. En été, la moyenne des températures, **22,2°C**, a faiblement augmenté par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 26,0°C, a par contre légèrement diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 30h/an, moins de la moitié du temps de CB. Cela équivaut à **0,3%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **18,2°C**, et la température minimale, 17,1°C, ont fortement augmenté par rapport à CB. Si la deuxième est toujours sous les 18°C, la première est passée au-dessus.

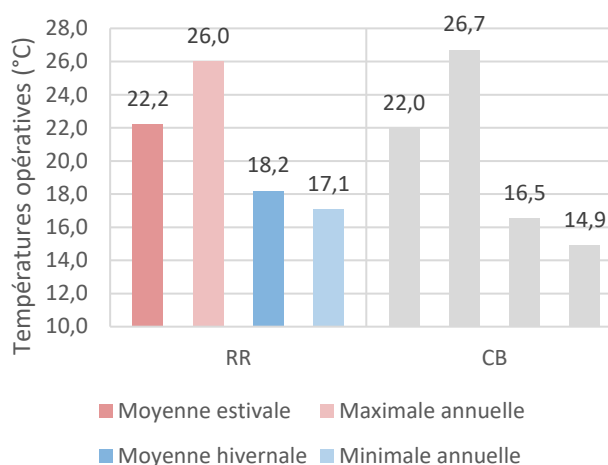


Figure 4-39: RR - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.6.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la La sensibilité de ces résultats, sans ou avec évolution du prix de l'énergie, est faible puisque ceux-ci ne varient que d'1-2% autour de RM, que ce soit pour RM- ou RM+.

Figure 4-40, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario RR, de **70.010€/80.933€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient, sans évolution, à une **augmentation de 7%** par rapport à CB et, avec évolution, à une **diminution de 4%**.

La sensibilité de ces résultats, sans ou avec évolution du prix de l'énergie, est faible puisque ceux-ci ne varient que d'1-2% autour de RM, que ce soit pour RM- ou RM+.

Figure 4-40 : RR - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

La Figure 4-41 détaille les types de coût, également calculés sur 30 ans. L'investissement, est évalué à 15.024€, et les coûts de maintenance et remplacement à 12.050€. Les coûts de fonctionnement, toujours dominants, s'élèvent à 42.936€/53.859€, sans/avec évolution. Cela équivaut à un gain modéré par rapport à CB de 17.752€/25.340€ sur 30 ans ou de 592€/845€ par an en moyenne. La taxe carbone serait, elle, de 12.148€. Cela correspond à un gain potentiel de 2.813€/30 ans, ou de 94€/an en moyenne, par rapport à CB.

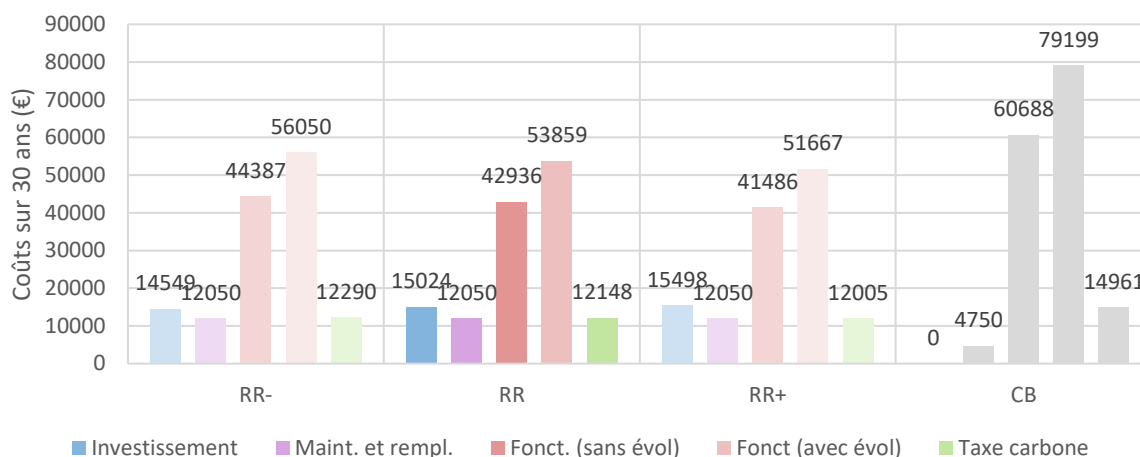


Figure 4-41: RR - Coûts détaillés sur 30 ans

Ce cas est particulier. Sans évolution, ces deux gains ne permettent pas de récupérer l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (22.324€). Après 30 ans, il reste, pour le gain sur l'énergie seul, un déficit de 4.572€ et, pour les deux gains combinés, un déficit de 1.759€.

Avec évolution, la récupération est possible. Après 30 ans, il apparaît, pour le gain sur l'énergie seul, un bénéfice de 3.016€ et, pour les deux gains combinés, un bénéfice de 5.829. Le résultat dépend donc du futur cours du prix de l'énergie.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-42, montre que les panneaux constituent plus d'un tiers du total. Le reste se répartit entre isolation surtout, VMC et frais de projet.

Coûts d'investissement TVAC (€)

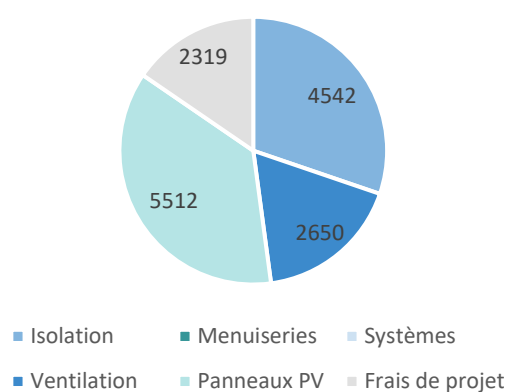


Figure 4-42 : RR - Répartition des coûts d'investissement

4.7 SCÉNARIO R+

Pour rappel, le scénario R+ correspond à une combinaison de toutes les mesures des scénarios précédents. Il s'agit donc du scénario le plus complet et le plus poussé, qui vise même certaines exigences du passif.

4.7.1 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie totale obtenue pour le scénario RR s'élève à **2.319 kWh/an**, soit **91%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffée de 162m², cela équivaut à une consommation spécifique de **14 kWh/an.m²**. Comme montré à la Figure 4-43, le total comprend une consommation d'électricité pour la PAC de 1381 kWh/an, soit une réduction de 94%

par rapport à CB, et d'électricité pour le reste de 938 kWh/an. Cette réduction de 62% par rapport à CB est due à une production de 1.522 kWh/an des panneaux PV.

La consommation d'électricité est donc tombée très bas. Surtout, celle-ci devient pratiquement constante sur l'année, gouvernée par les besoins en ECS, éclairage et équipements (voir Figure 4-44).

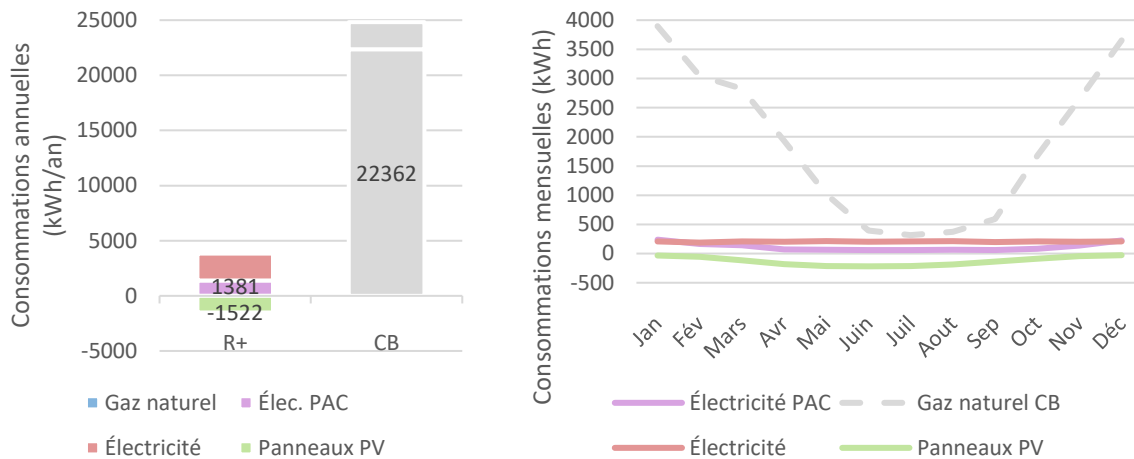


Figure 4-43 (gauche) : R+ - Consommations d'énergie annuelles
 Figure 4-44 (droite) : R+ - Consommations d'énergie mensuelles

4.7.2 Emission de CO₂

Les émissions de CO₂ totales évaluées pour le scénario R+ sont de **751 kg CO₂/an**, c'est-à-dire **85%** de moins que pour CB. Pour une surface de plancher chauffé de 162m², cela équivaut à des émissions spécifiques de **5 kg CO₂/an.m²**. Comme illustré à la Figure 4-45, le total comprend des émissions pour l'électricité consommée par la PAC de 479 kg CO₂/an, soit une diminution de 89% par rapport au gaz de CB, et des émissions pour le reste de l'électricité consommée de 272 kg CO₂/an, 62% de moins que CB.

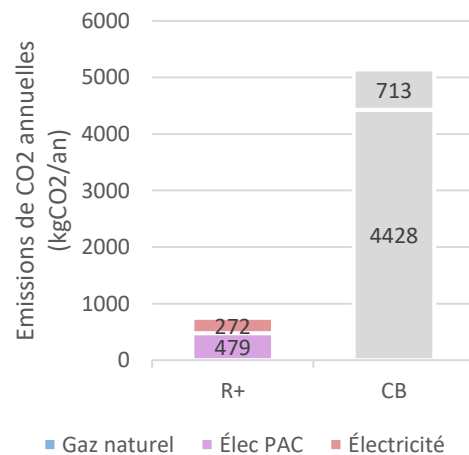


Figure 4-45 : R+ - Émissions de CO₂ annuelles

4.7.3 Confort thermique

La Figure 4-46 présente les températures opératives évaluées pour le scénario R+. En été, la moyenne des températures, **23,2°C**, a augmenté de plus d'un degré par rapport à CB mais est également en dessous de 25°C. La température maximale, 26,1°C, a par contre légèrement diminué.

Une surchauffe n'est d'ailleurs évaluée que pour 54h/an, moins de la moitié du temps de CB. Cela équivaut à **0,6%** du temps, ce qui est toujours inférieur à 5%, comme recommandé.

En hiver, la moyenne des températures, **18,8°C**, et la température minimale, 17,6°C, ont fortement augmenté par rapport à CB. Si la deuxième est toujours sous les 18°C, la première est passée au-dessus.

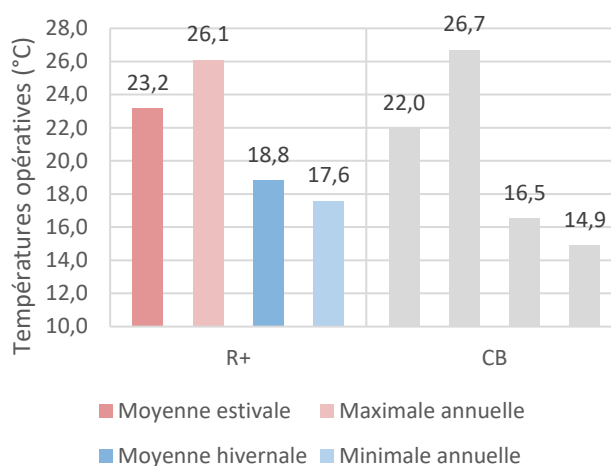


Figure 4-46 : R+ - Températures opératives moyennes et extrêmes

4.7.4 Coût du cycle de vie

Comme représenté à la Figure 4-47, le total des coûts sur 30 ans est, pour le scénario R+, de **103.366€/113.534€**, sans/avec évolution du prix de l'énergie. Cela revient à une augmentation de 58%/35% par rapport à CB.

La Figure 4-48 détaille les types de coûts, également calculés sur 30 ans. L'investissement, qui est devenu prédominant, est évalué à 59.916€ et les coûts de maintenance et remplacement à 23.550€. Les coûts de fonctionnement, plus secondaires ici, s'élèvent à 19.900€/30.068€, sans/avec évolution. Cela équivaut à un gain important par rapport à CB de 40.788€/49.131€ sur 30 ans ou de 1.360€/1.638€ par an en moyenne. La taxe carbone serait, elle, de 2.186€. Cela correspond à un gain potentiel de 12.775€/30 ans, ou de 426€/an en moyenne, par rapport à CB.

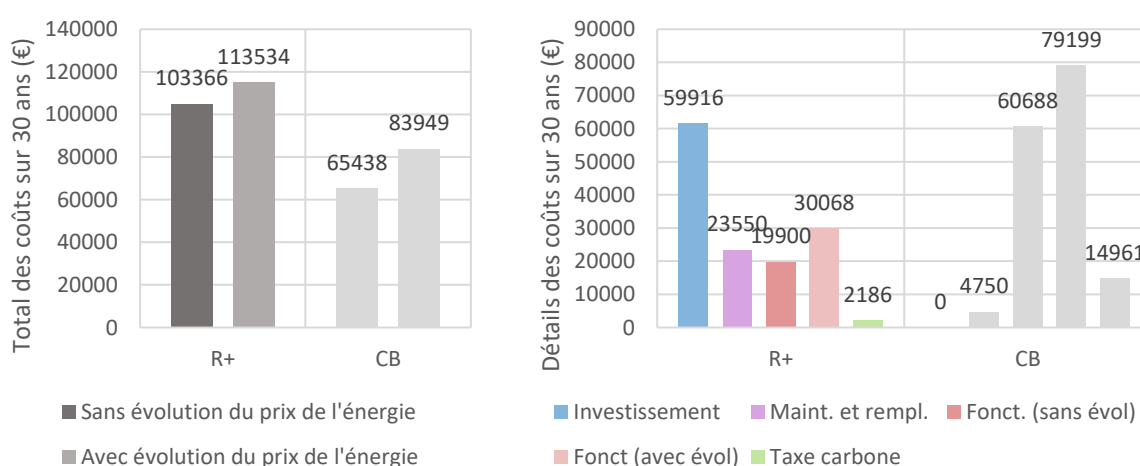


Figure 4-47 (gauche) : R+ - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

Figure 4-48 (droite) : R+ - Coûts détaillés sur 30 ans

Ces deux gains ne permettent pas de récupérer l'investissement initial et les surcoûts de maintenance (78.716€). Après 30 ans, il resterait, pour le gain sur l'énergie seul, un déficit de 37.927€/29.585€ et, pour les deux gains combinés, un déficit de 25.153€/16.811€.

La distribution des coûts investis, visible à la Figure 4-49, montre que les contributeurs principaux au montant total sont l'isolation (~1/4), les menuiseries (~1/4) et les systèmes de chauffe (~1/6).

Coûts d'investissement TVAC (€)

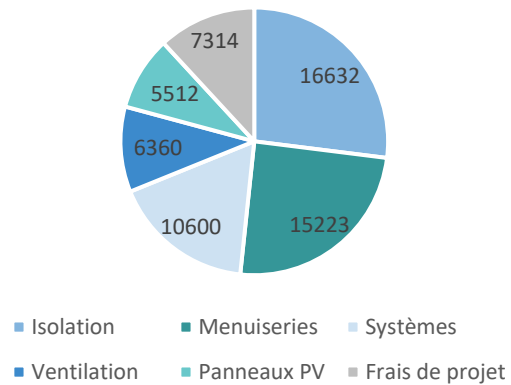


Figure 4-49 : R+ - Répartition des coûts d'investissement

4.8 ANALYSE COMPARATIVE

4.8.1 Consommation d'énergie

La Figure 4-50 compare les résultats de consommations d'énergie annuelles pour le cas de base et les six scénarios étudiés. Le classement des résultats obtenus, du plus au moins performant, est le suivant :

1. R+ → 2.319 kWh/an
2. RS → 7.246 kWh/an
3. RI → 8.053 kWh/an
4. RM → 20.045 kWh/an
5. RR → 20.647 kWh/an
6. R0 → 22.157 kWh/an
7. CB → 24.822 kWh/an

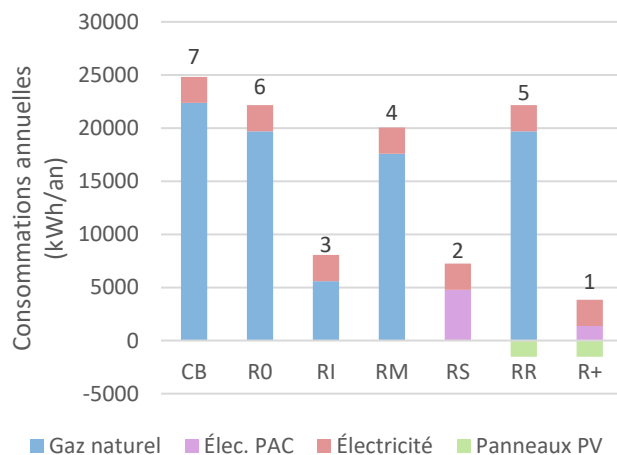


Figure 4-50 : Comparaison des consommations d'énergie annuelles

Les scénarios principaux, R0 et R+, encadrent, de manière évidente, les résultats, incarnant respectivement une rénovation simple, à la base de tous les autres scénarios, et une rénovation complète, réunissant les scénarios intermédiaires.

Le scénario à la deuxième place, RS, la doit à la consommation bien moindre en électricité d'une PAC par rapport à une consommation de gaz pour les mêmes usages. Ce bénéfice est permis grâce à l'utilisation d'une énergie renouvelable : l'air extérieur et la chaleur qu'il contient. Cette réduction est tout de même limitée,

surtout si l'installation de la PAC n'est pas accompagnée d'une isolation convenable de l'enveloppe.

RS est talonné par le scénario RI. L'amélioration du niveau d'isolation des parois au-delà des exigences minimales est un moyen extrêmement efficace de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage. R0 prouve qu'une isolation partielle ne permet qu'une faible diminution de celle-ci. De même, le scénario RM, qui arrive en 4^{ème} position ne montre qu'une faible amélioration de la situation existante. Remplacer les menuiseries par un châssis et/ou un vitrage plus performant n'a en effet pas grand intérêt si le reste de l'enveloppe est une passoire énergétique.

L'avant dernier scénario, RR, n'apporte que peu de gains en énergie puisque seule la consommation d'électricité peut être touchée. Pour un système de chauffe au gaz, la réduction de consommation ne peut pas aller au-delà de celle d'électricité, qui est bien moindre que celle du gaz. Dans le cas d'une PAC, les bénéfices potentiels sont plus importants mais il n'est pas toujours permis de profiter d'une surface de toiture bien exposée assez grande que pour subvenir à tous les besoins en électricité. En particulier, les habitations se situant en milieu urbain, comme le cas d'étude, ont souvent des toitures réduites, à plusieurs pans ou avec fenêtres et autres reliefs. Les panneaux solaires PV ne peuvent donc pas toujours être exploités à leur plus haut potentiel. Ce n'est donc pas dans la réalisation d'économies d'énergie telles quelles que réside son plus grand intérêt.

4.8.2 Emission de CO2

La Figure 4-51 montre que les émissions de CO₂ totales ne sont pas tout à fait proportionnelles aux consommations totales puisque le classement change :

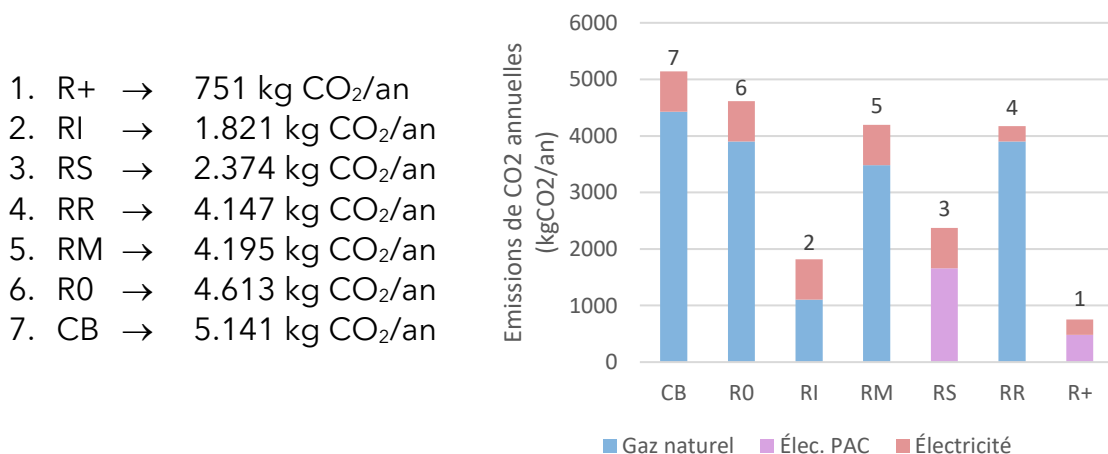


Figure 4-51 : Comparaison des émissions de CO₂ annuelles

La raison de ce bouleversement est la différence entre les indices de conversion pour les différentes énergies. L'indice pour la conversion du gaz est moins haut que celui pour l'électricité, lui-même inférieur à celui pour le fonctionnement d'une PAC. Le scénario comprenant une PAC, RS, est donc pénalisé tandis que celui ayant une consommation d'électricité moins élevée, RR, est avantagé.

4.8.3 Confort thermique

Les températures opératives liées au confort d'été de tous les scénarios sont reprises à la Figure 4-52. Si la température maximale intérieure évaluée pour l'année est toujours supérieure à 25°C, la température moyenne estivale est toujours sous ce seuil. Les valeurs des différents scénarios sont assez proches, autour de 22°C. Les scénarios RI et R+ se démarquent légèrement avec une température d'environ 23°C. Le niveau d'isolation plus important explique ce phénomène. En été, la chaleur captée par les ouvertures reste davantage enfermée dans l'enveloppe.

La Figure 4-53 illustre le temps de surchauffe pour chaque scénario. Tous inférieurs à 1%, ils sont loin des 5% maximum recommandés.

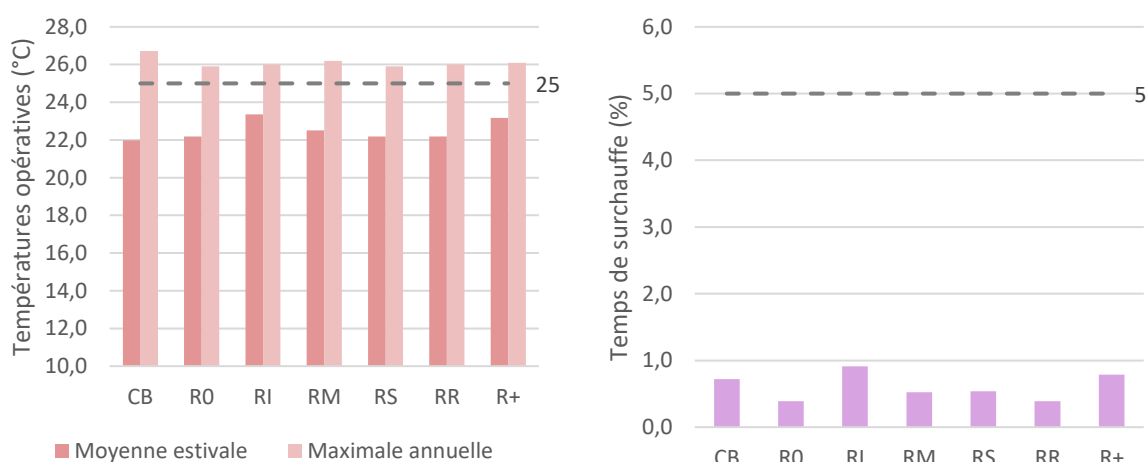


Figure 4-52 (gauche) : Comparaison des températures opératives - confort d'été
Figure 4-53 (droite) : Comparaison des temps de surchauffe

Puisqu'il ne semble pas y avoir de risque de surchauffe, le confort thermique associé aux scénarios est axé sur le confort d'hiver, plus critique en Belgique. La Figure 4-54 compare les températures opératives liées au confort d'hiver. Le classement des scénarios selon la température moyenne hivernale est le suivant :

1. RI → 19,5°C
2. R+ → 18,8°C
3. RM → 18,3°C
4. R0/RR/RS → 18,2°C
5. CB → 16,5°C

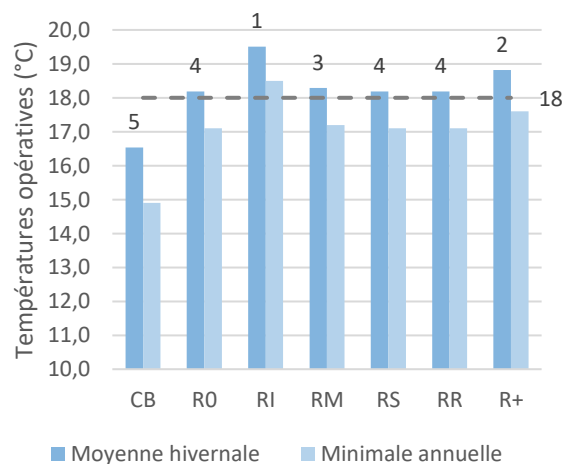


Figure 4-54 : Comparaison des températures opératives - confort d'hiver

La température minimale déterminée pour l'année varie davantage mais seule celle du scénario RI dépasse les 18°C. De même, les températures moyennes hivernales sont très variables d'un scénario à l'autre mais sont toutes supérieures à ce seuil. RI et R+ se distinguent à nouveau avec des valeurs plus hautes. L'explication est la même : le niveau d'isolation réduit la perte de chaleur vers l'extérieur, facilitant le maintien de la température de consigne.

4.8.4 Coûts sur le cycle de vie

La Figure 4-55 compare les coûts totaux, sans et avec évolution du prix de l'énergie, pour les six scénarios et le cas de base. Puisque les classements divergent si l'on considère l'évolution ou non, deux classements des résultats sont effectués :

Sans évolution :

1. RI	→	62.148
2. CB	→	65.438
3. RR	→	70.010
4. R0	→	73.571
5. RM	→	86.883
6. RS	→	98.146
7. R+	→	103.366

Avec évolution :

1. RI	→	74.865
2. RR	→	80.933
3. CB	→	83.949
4. R0	→	91.161
5. RM	→	103.743
6. R+	→	113.534
7. RS	→	129.915

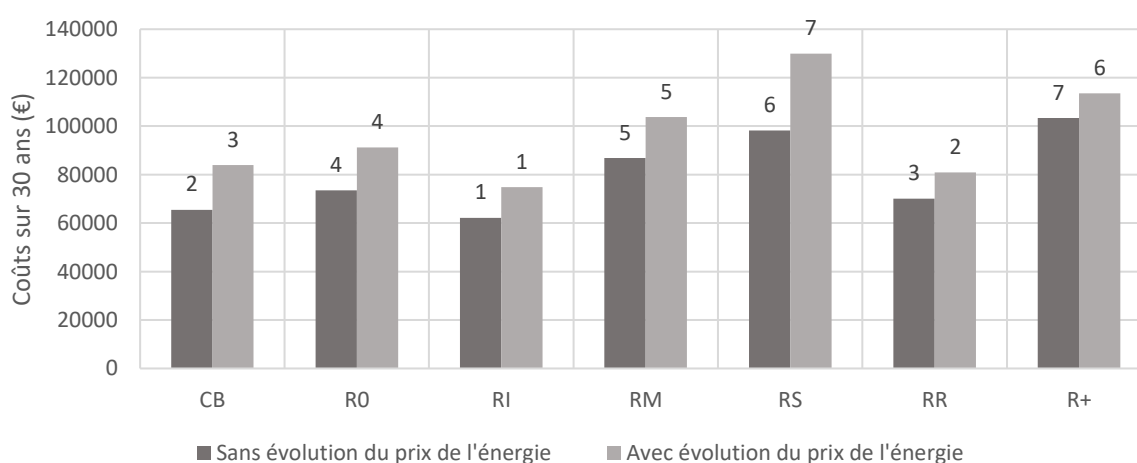


Figure 4-55 : Comparaison des coûts totaux sur 30 ans (hors TC)

Le scénario RI est premier des deux classements, grâce à un bon équilibre entre montant investi et gains sur la facture d'énergie. Il est d'ailleurs le seul à toujours permettre un retour sur investissement avant 30 ans. R+ se trouve, par contre, très bas dans les classements. Les économies d'énergie sont loin de récupérer l'investissement initial et les coûts de maintenance et remplacement.

Il est intéressant de remarquer que le cas de base est bien situé dans les deux classements. Les projets de rénovation ne sont effectivement pas toujours financièrement avantageux par rapport à la situation de départ, mais ils améliorent

bien d'autres aspects, notamment le respect de l'environnement et le confort de l'occupant.

Les changements de position par rapport au classement selon les consommations, ou entre ces deux classements, sont dues au coût de l'électricité, facilement quadruple de celui du gaz. L'impact augmente encore en considérant une évolution des prix de l'énergie car celle de l'électricité est plus importante que celle du gaz. Ainsi, au niveau des coûts, plus un scénario est basé sur la consommation d'électricité, comme RS, plus il est désavantageux. A l'inverse, plus il est économe en électricité, comme RR, plus il est rentable. Il convient donc de vérifier, si l'on souhaite se chauffer à l'électricité, que l'économie d'énergie compense au minimum les surcoûts d'énergie occasionnés.

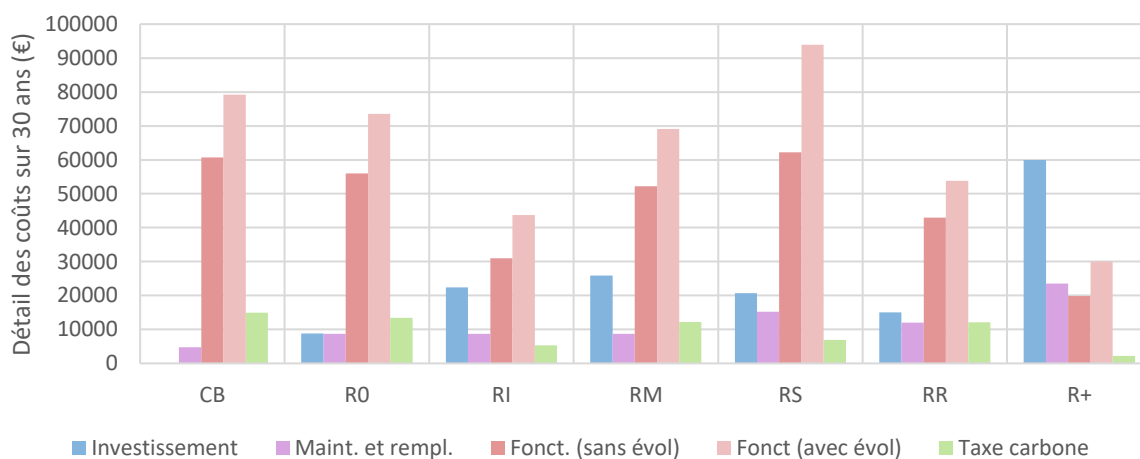


Figure 4-56 : Comparaison des coûts détaillés sur 30 ans

4.9 CONCLUSION

Avant de s'intéresser à la principale question de recherche, des réponses peuvent être apportées aux trois sous-questions qui avaient été élaborées.

- **Quel est l'impact de certaines mesures de rénovation sur la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ et le niveau de confort thermique d'un cas d'étude ?**

Pour une rénovation simple du logement (R0), comme définie précédemment, la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ est peu importante. Le confort d'hiver est par contre sensiblement amélioré par rapport au cas de base.

Une isolation poussée de toutes les parois (RI) diminue drastiquement la consommation de gaz ainsi que les émissions de CO₂. Les températures minimales sont également grandement augmentées.

Le remplacement des menuiseries (RM) n'a qu'un impact modéré sur la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Le confort d'hiver n'est, lui, que très légèrement amélioré par rapport à la rénovation de base.

Pour l'installation d'une PAC air-eau comme système de chauffe (RS), la consommation d'électricité pour le chauffage et la production d'ECS est considérablement réduite. Cet effet est légèrement amoindri pour les émissions de CO₂. Le confort d'hiver n'est, par contre, pas différent de celui de la rénovation de base.

L'ajout de panneaux PV en toiture entraîne une diminution importante de la consommation d'électricité mais peu significative à l'échelle de la consommation totale. Cet effet réducteur est encore amoindri pour les émissions de CO₂. Le confort d'hiver n'est, à nouveau, pas impacté par rapport à la rénovation de base.

Une rénovation complète de l'habitation fait tendre la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ vers zéro. Les températures minimales ressenties sont bien plus élevées que celles mesurées pour le cas de base.

– **Quelles sont les économies financières possibles sur le long terme ?**

En réalité, tous les scénarios ne garantissent pas des gains financiers sur le long terme. En considérant des prix de l'énergie à hauteur de ceux de 2019, seul un scénario peut être rentable avant 30 ans par rapport au cas de base : l'isolation poussée de toutes les parois (RI). Si une évolution croissante des prix de l'énergie, comme définie auparavant, est prise en compte, un autre scénario peut permettre un retour sur investissement sur cette période : l'ajout de panneaux PV.

Les autres scénarios induisent des coûts d'investissement et des surcoûts de maintenance et de réparation trop conséquents pour être récupérés avant 30 ans par les gains sur l'économie d'énergie réalisée par rapport au cas de base, même si ces gains sont eux aussi élevés. Il est même possible, pour une mauvaise composition du projet de rénovation, de ne pas du tout gagner sur la diminution de la consommation d'énergie (par exemple, le scénario RS- : PAC moyennement performante, isolation de l'enveloppe modérée et pas de panneaux PV).

– **Quelle est la sensibilité de ces quatre paramètres (consommations, émissions, confort et coûts) face à la variation de certaines mesures étudiées ?**

Les scénarios RI et RM montrent que les quatre paramètres sont assez peu sensibles aux variations d'épaisseur d'isolant dans les parois ou de valeurs U des menuiseries. Les valeurs exactes choisies pour caractériser ces mesures n'ont donc pas d'influence majeure sur les principaux résultats obtenus.

Le scénario RS, par contre, prouve que la valeur de la CoP choisie pour la PAC parmi un rang de valeurs courantes a un impact significatif sur les résultats de consommation et d'émission de CO₂. Cette sensibilité se constate d'autant plus dans l'étude des coûts : en fonction de la valeur de CoP définie, le scénario peut être légèrement rentable par rapport au cas de base ou occasionner d'importantes pertes. L'influence du prix élevé de l'électricité est plus grande que jamais.

Le scénario RR démontre que la consommation d'électricité est très sensible au choix de la valeur de rendement parmi les valeurs communes. Toutefois, dans le cas d'un chauffage au gaz, cette sensibilité se dilue à l'échelle de la consommation

totale. De même, si une certaine sensibilité des coûts de l'énergie est constatée, le coût total du projet à long terme ne varie que peu.

Il est maintenant temps d'apporter une réponse à la principale question de recherche :

« Pour une habitation wallonne en milieu urbain typique et un investissement financier initial de maximum 60.000€, quelles sont les mesures de rénovation à privilégier ? »

La mesure la plus efficace, tous paramètres d'étude confondus, est sans conteste l'isolation poussée de toutes les parois du logement (toitures, plafond vers combles, façades et plancher sur cave). Si le remplacement des menuiseries n'est pas tellement efficace en comparaison, les deux mesures restent complémentaires pour assurer une isolation optimale de l'enveloppe.

L'amélioration du système de chauffe existant par l'installation d'une PAC air-eau est également une mesure de grande efficacité énergétique. Mais il est indispensable de choisir un modèle performant et de l'associer à d'autres mesures (isolation, panneaux PV) si l'on veut éviter de grandes pertes sur le long terme.

L'ajout de panneaux PV en toiture a un impact restreint à la réduction de consommation d'électricité. Donc, plus la part d'électricité dans la l'énergie totale consommée est importante, plus le potentiel d'économie d'énergie est haut (pour un nombre de panneaux non limité par la surface de toiture disponible). Grâce au prix élevé de l'électricité, il s'agit surtout d'une mesure qui a un bon potentiel de rentabilité pour peu que l'on choisisse des panneaux à haut rendement.

Pour conclure ce chapitre, les principaux résultats quantitatifs issus de cette étude peuvent être retrouvés au sein d'un document récapitulatif simple et visuel, qui les rend plus abordables. Ce document est présenté à l'Annexe 4.

5 DISCUSSION

Après avoir mis en œuvre la méthodologie élaborée et avoir recueilli les résultats attendus, une discussion de ces résultats et de l'étude dans sa globalité est de mise.

Ce cinquième chapitre se compose de quatre parties. La première est une discussion des résultats obtenus et présentés au chapitre précédent. La deuxième est un récapitulatif des découvertes majeures de ce travail, accompagnées de recommandations à l'adresse du lecteur. La troisième est une évaluation de l'étude en elle-même, incluant la mise en évidence de ses forces et de ses faiblesses principales. La quatrième partie concerne l'impact espéré du travail projeté dans le temps ainsi et évoque de nouvelles perspectives de recherche.

5.1 DISCUSSION DES RÉSULTATS

A la lumière de la revue des études similaires et du retour de Liège-Énergie, certaines remarques peuvent être émises sur les principaux résultats récoltés.

D'un côté, les résultats en lien avec la consommation d'énergie, les émissions de CO₂ et le confort ne sont pas surprenants et correspondent bien aux conclusions trouvées dans la littérature : chaque scénario présente une amélioration par rapport à la situation initiale. Et comme Galimshina et al. (2021) le constataient dans leur étude, l'isolation de l'enveloppe et le changement du système de chauffage, par exemple pour une PAC, sont les mesures les plus efficaces en termes d'amélioration de la performance énergétique de l'habitation.

Il faut tout de même rappeler que les menuiseries du cas d'étude ayant déjà été changées pour du double vitrage il y a quelques années, l'amélioration de la peb est moindre pour un changement « double vitrage - triple vitrage » que pour un changement « simple vitrage - double vitrage ». Pour les habitations qui auraient encore du simple vitrage, l'impact du changement des menuiseries serait beaucoup plus notable.

De l'autre côté, les résultats issus de l'étude des coûts peuvent davantage surprendre : peu de scénarios sont rentables au bout de 30 ans. La littérature diverge sur le sujet et la rentabilité des mesures et scénarios de rénovation varie beaucoup d'une recherche à l'autre. En effet, comme il l'a été remarqué dans l'exploration du concept, l'ACCV reposent sur de nombreuses hypothèses, qui sont au choix des parties prenantes. (Guide Bâtiment Durable, 2018) Certaines des hypothèses posées dans ce travail peuvent donc expliquer le manque de rentabilité des scénarios étudiés.

D'abord, la durée d'étude, cruciale en ACCV, est choisie plus courte (30 ans) que d'autres recherches. Allacker et al. (2011) considèrent, par exemple, une période de 60 ans. Or, comme ils le disent eux-mêmes, plus longue est la période d'étude de coûts, les travaux de rénovation sont favorisés. Cela est dû aux gains sur la moindre consommation d'énergie qui se poursuivent, voir augmentent, avec le temps, rattrapant les coûts d'investissement et les surcoûts de maintenance et

remplacement. Par ailleurs, le taux d'évolution des prix de l'énergie, évalués plus bas que ceux conseillés par certaines sources XXX, et le prix de l'électricité en Belgique, plus élevé que dans d'autre pays européens (Gaudiaut, 2021), sont deux autres facteurs perturbateurs de l'étude des coûts dans ce travail.

Ensuite, comme spécifié lors de la délimitation de l'étude, il a été choisi de ne pas prendre en compte les primes Habitation proposées par la Région wallonne, l'octroi et les montants de celles-ci étant trop incertains dans le temps. De plus, le coefficient multiplicateur dépend de la catégorie de revenus du ménage (coefficient de 1 à 6). Néanmoins, il est évident qu'une diminution du coût d'investissement initial est une manière efficace d'augmenter la rentabilité du projet de rénovation. Il faut toutefois être attentif au fait qu'il existe des exigences à respecter pour pouvoir prétendre aux primes : U_{max}, critères de rendement minimum... Notamment, pour une pompe à chaleur, un niveau d'isolation minimal est requis.

A titre d'exemple, Walloreno présente le cas d'un ménage composé d'un couple avec un enfant à charge, de classe de revenus R4 (primes multipliées par 2) habitant une maison à la typologie très similaire au cas d'étude. Les primes pour le projet de rénovation permettant de passer d'un label E à A sont évaluées à 8.600€. (Walloreno, s. d.) L'audit du cas d'étude estime également les primes pouvant être octroyé pour une rénovation complète à 7.600€. Ces deux projets ressemblent beaucoup au scénario R+. Les primes potentielles dans ce cas tourneraient donc autour des 8.000€, soit environ 13% du coût d'investissement de R+. Cela permettrait de réduire de 20% les pertes sur 30 ans.

Puis, il a été accepté dans cette étude que les différents scénarios intègrent des coûts « sans impact énergétique ». Ces investissements, qui ne participent pas à la réduction de la consommation d'énergie, ont été jugés nécessaire pour diverses raisons : l'installation d'une VMC, pour des raisons de confort et de santé, et les principaux frais de projet, pour des raisons de représentativité de la réalité. Ces coûts ne sont donc pas directement « récupérables » puisqu'ils n'entraînent pas d'économie d'énergie, et défavorisent la rentabilité des scénarios. Dans d'autres cas, il peut également s'agir de travaux de mise en salubrité ou conformité de l'habitation.

Enfin, même si cela n'est que rarement pris en compte dans les études de coûts, la rénovation énergétique d'une habitation lui donne une valeur ajoutée, aussi appelée « valeur verte ». Cette plus-value peut être partiellement récupérée lors de la vente du logement. (Charlot-Valdieu & Outrequin, 2018)

Pour terminer, il faut aussi reconnaître que deux types d'impacts n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Le premier est l'impact environnemental des matériaux et équipements composant les scénarios. Comme mentionné dans la revue du concept des impacts environnementaux, une partie des émissions de CO₂ d'un bâtiment est liée à la fabrication, au transport et à la mise en œuvre des composants. (Energie Plus Le Site, 2021) Le deuxième impact non considéré est les travaux de rénovation en eux-mêmes, surtout ceux d'isolation. Il peut s'agir d'un impact sur la taille ou la disposition des pièces ou de l'obligation de devoir découcher pendant la durée des travaux. Le degré d'acceptabilité des propriétaires est donc en jeu et assez difficile à généraliser et évaluer. Il est possible que la prise

en compte de ces deux critères influence les résultats obtenus pour les quatre paramètres retenus.

5.2 DÉCOUVERTES MAJEURES

Les découvertes majeures réalisées à travers cette étude sont que :

- les mesures de rénovation diminuent la consommation d'énergie, réduisent les émissions de CO₂ en phase d'utilisation et améliorent le confort thermique, surtout en hiver ;
- les mesures d'isolation et de changement du système de chauffe sont les plus performants ;
- les projets de rénovation ne sont pas toujours rentables à moyen-terme (30 ans) mais la rentabilité augmente avec le temps ;
- les prix de l'énergie et leur évolution dans le temps influencent grandement la rentabilité d'un projet de rénovation et plus l'énergie sera chère, plus le projet sera rentable ;
- les coûts de maintenance et de remplacement sont non-négligeables et plus le projet de rénovation est élaboré (plusieurs équipements de type PAC, VMC, panneaux...), plus les coûts seront importants ;
- l'anticipation d'une tarification carbone est avantageuse pour les projets de rénovation et plus la tarification sera sévère, plus le projet sera rentable.

Trois recommandations principales peuvent alors en être tirées :

- bien composer les projets pour améliorer la performance et la rentabilité globale (certaines mesures sont complémentaires, voire indissociables) ;
- envisager tous les types de coûts lors d'une ACCV, même simplifiée, pour prendre en compte tous les déficits et gains potentiels ;
- se projeter au-delà du cadre réglementaire ou des recommandations actuelles.

5.3 FORCES ET LIMITATIONS DE L'ÉTUDE

5.3.1 Validité des résultats

Afin de garantir la validité et la précision des résultats finaux, plusieurs stratégies ont été mises en œuvre tout au long de la recherche.

Pour commencer, une démarche indispensable à tout travail de recherche sérieux est la collecte et l'utilisation de données issues de sources pertinentes et fiables. Que ce soit la recherche d'informations afin d'établir l'état de l'art ou la collecte de données pour la mise en œuvre de la méthodologie, toutes les sources ont été choisies avec soin et recoupées. La priorité est ainsi donnée aux ouvrages papier, aux articles de revues scientifiques ou techniques ainsi qu'aux rapports de recherche. L'utilisation de page web est limitée et réservée, quand cela est possible,

aux sites internet reconnus (Liège-Énergie, Région wallonne, Energie Plus Le Site, CREG...).

Ensuite, de manière à rattacher les résultats qui en découlent à la réalité, l'étude se veut intégrée à un contexte réel : cas d'étude existant, respect de la réglementation wallonne, utilisation de données à l'échelle régionale ou national...

Les conseils et la mise à disposition de ressources de la part d'experts et professionnels ont également été recherchés. En premier lieu, le travail a été revu à plusieurs reprises par divers chercheurs de l'Université de Liège, spécialisés dans le domaine de la construction et de la rénovation. Leurs avis et commentaires ont ainsi permis de le guider et de l'enrichir. En second lieu, une collaboration a été établie avec un acteur majeur du monde de la rénovation et de l'énergie à Liège : Liège-Énergie. Cette collaboration a apporté un éclaircissement sur la réalité du terrain, une aide dans la recherche d'un cas d'étude approprié et dans la récolte des données associées ainsi qu'un retour sur les résultats finaux. L'étape de retour est importante puisque cette étude vise particulièrement à apporter une expertise supplémentaire et un exemple documenté aux plateformes de rénovation ou autres structures similaires.

De plus, la méthodologie élaborée pour obtenir les résultats visés se veut la plus fiable et scientifique possible. D'un côté, une revue sérieuse de la littérature a permis de fixer des hypothèses de départ pertinentes (critères de sélection du cas d'étude, variables et paramètres à étudier, caractérisation des scénarios...) et de traiter les données récoltées selon des standards reconnus et adaptés. D'un autre côté, l'outil principal a été choisi dans le but d'assurer une modélisation et une simulation à la fois qualitatives et ajustées aux objectifs de cette recherche. EnergyPlus, ici à travers le logiciel DesignBuilder, est un programme largement utilisé et apprécié dans la recherche liée à l'énergie et au bâtiment.

L'étude n'a pas négligé l'étape de validation du modèle de base, qui est primordiale afin de s'assurer que celui-ci constitue bien une représentation valide du cas d'étude réel, ou, tout du moins, du point de vue des résultats de consommation énergétique. Lors de la modélisation de la géométrie et de l'encodage des paramètres, de nombreuses simplifications et hypothèses ont dû être effectuées. Il était donc indispensable de vérifier la proximité entre les résultats de consommation émis par simulation et les résultats réels, connus grâce aux relevés de consommation du bâtiment. En effet, ce modèle sert de base à toute la suite de l'étude : exploration des scénarios de rénovation, récolte et analyse des résultats, conclusion et recommandations. Il se devait donc d'être le plus représentatif possible du cas réel. Les premiers résultats de consommation obtenus par simulation n'étant pas suffisamment proches de ceux des relevés, le modèle a dû être calibré. Des modifications du paramétrage initial ont été effectuées afin de corriger ou réduire les erreurs et imprécisions décelées dans le modèle. Après quelques itérations, les résultats simulés se sont suffisamment rapprochés des résultats réels, permettant de valider le modèle et donc de l'utiliser pour la suite de l'étude.

Une dernière technique mise en place pour évaluer la validité des résultats est l'étude de la sensibilité des paramètres étudiés à la variation de certaines données

en entrée. Pour cela, quatre sous-variables, pour lesquelles une valeur exacte avait dû être fixée mais qui était susceptible de varier, ont été sélectionnées. En plus du scénario principal, deux scénarios, un défavorable et un favorable, ont été modélisés, simulés, traités et analysés. Cette opération a permis de déterminer quels paramètres sont sensibles à quelles variables, et selon quelle importance.

5.3.2 Reproductibilité de l'étude

Afin de faciliter la compréhension et la reproduction de ce travail de recherche, les grandes étapes qui constituent la méthodologie mise en œuvre sont rédigées de la manière la plus précise, détaillée et référencée possible.

Pour commencer, les données principales relatives au cas d'étude à disposition sont présentées, de même que tous les éléments constituant les scénarios de rénovation étudiés ou leurs variations. L'ensemble de la base de données utilisée est ainsi réutilisable par les lecteurs qui le souhaitent.

Ensuite, la manière de modéliser le cas de base est grandement détaillée : encodage des paramètres, lancement des simulations, calibration et validation du modèle. De plus, différents fichiers Excel (Annexe 2) répertorient l'ensemble des paramètres encodés dans le logiciel DesignBuilder, permettant à d'autres de pouvoir recréer pratiquement à l'identique les modèles utilisés dans cette étude, ou d'appliquer les mêmes hypothèses à un autre cas d'étude.

Enfin, la façon de traiter les données obtenues par simulation est également exposée avec précision afin de permettre de reproduire un traitement identique, éventuellement sur d'autres données que celles de cette étude. Les calculs effectués et tous les résultats en découlant sont repris dans un fichier Excel (Annexe 3).

5.3.3 Limitations

Dans cette section, sont abordées les limitations de l'étude qui ne sont pas le fruit de choix volontaires. Les délimitations volontaires de la recherche ont déjà été exposées dans le chapitre dédié à la méthodologie, notamment à la section 3.1.3.

La première limitation est inhérente au type de méthodologie choisie : l'analyse d'un cas d'étude basé existant. Même si l'habitation a été sélectionnée pour être la plus représentative de la typologie ciblée, celle-ci possède ses particularités : grandes coupoles dans le salon, occupation très réduite du deuxième étage, très petite surface de toiture bien exposée... Toutes ces caractéristiques propres peuvent avoir une influence, plus ou moins importante, sur les résultats obtenus et font qu'ils ne peuvent être considérés que comme des ordres de grandeurs pour ce type d'habitation.

Une autre limitation avec laquelle il a fallu travailler est la quantité et le niveau de détail des données de consommation du cas d'étude qui ont été plus limités qu'espéré initialement. Comme spécifié dans le Tableau 3-1, il était attendu de l'habitation choisie comme cas d'étude de pouvoir fournir des données de consommations annuelles (idéalement mensuelles) sur au moins trois années

(idéalement cinq). Les propriétaires actuels n'occupant la maison que depuis 2019, il n'a pas été possible de recueillir plus d'une année de relevé de consommation. De plus, les données envoyées par Resa n'étaient finalement que des relevés annuels et non mensuels. Ces relevés des consommations pour une année ont tout de même permis de calibrer le modèle mais la calibration aurait pu être plus fine si des données plus précises avaient été disponibles.

Les secteurs économiques sont également en constante évolution et souvent difficile à prévoir. Pour mener l'étude des coûts, des hypothèses ont dû être posées (par exemple, le choix d'un scénario de taxe carbone) et des moyennes déterminées (notamment les taux d'évolution des prix de l'énergie). Mais malgré l'utilisation de références pour tenter de s'approcher au mieux de la réalité, il est extrêmement difficile de réaliser une étude de coût précise et juste sans mettre en œuvre de grandes compétences en économie. Les résultats financiers de cette étude sont donc principalement indicatifs et ne peuvent refléter parfaitement la réalité économique actuelle et surtout future.

À cela, s'ajoute l'influence de la crise sanitaire sur les données de coût utilisées. S'il a été choisi de la négliger dans cette étude, par l'utilisation de données d'années antérieures (2019 pour les prix de l'énergie et 2017 pour les coûts d'investissement), il est indéniable qu'en réalité, de nombreux marchés ont été impactés, et en particulier celui de l'énergie. En 2020, lorsque la pandémie de coronavirus a débuté, les cours des prix de l'électricité et surtout du gaz ont drastiquement chuté, atteignant des montants historiquement bas. Mais en 2021, avec la reprise des activités et donc de la demande, les tarifs sont remontés en flèche (revoir la Figure 3-11). Et il n'est pas impossible que cette ascension se maintienne dans les années à venir. (Nguyen, 2021) Mais puisqu'il est encore difficile, à l'heure actuelle, d'estimer les impacts sur le long terme de cette crise, les résultats issus de l'étude des coûts sont à considérer avec d'autant plus de précautions.

5.4 IMPACT ET PERSPECTIVES

5.4.1 Impact du travail

L'impact potentiel de ce travail de recherche s'observe sur trois échelles de temps.

Au moment même de la mise œuvre de l'étude, un contact est établi entre la plateforme de rénovation énergétique Liège-Énergie, représenté par son délégué à la gestion journalière M. Gedik, et le SDB Lab de l'Université de Liège, à travers le Pr Attia et moi-même. Les deux services poursuivant certains objectifs communs et ayant accès à des ressources spécifiques, le développement d'une collaboration peut s'avérer profitable à l'un comme à l'autre.

À court terme, les résultats issus de cette recherche peuvent aider la plateforme Liège-Énergie, ou d'autres structures offrant le même type de services, à améliorer leur service de conseil et d'accompagnement des candidats rénovateurs et en particulier, ceux intéressés par les prêts à taux zéro. Un exemple de projet de

rénovation documenté et analysé peut être un outil concret et efficace pour aider certains propriétaires à appréhender les bienfaits potentiels de certaines mesures sur leurs consommations, leur confort et leur facture énergétique.

À long terme, l'objectif ultime de ce type d'étude est, par la participation à une meilleure connaissance du sujet, d'encourager davantage de ménages wallons à rénover leur logement. En cas de subventionnement, l'objectif de Liège-Énergie serait d'augmenter le label énergétique d'au moins un label pour 100 ménages par an. Sur les trois ans de financement, 60 habitations sur les 300 réaliseraient même le label A en 2050.

5.4.2 Pistes de recherche

L'étude menée dans ce travail peut être considérée en trois grandes parties : « sélection et modélisation du cas d'étude », « élaboration et modélisation des scénarios » et « traitement des données ». Chaque partie peut donner lieu à des pistes de recherche différentes que celles choisies pour ce travail.

Concernant la première partie, le bâtiment qui a été sélectionné comme cas d'étude pourrait être remplacé par un bâtiment :

- correspondant aux mêmes hypothèses (en Wallonie, logement, maison unifamiliale mitoyenne) et qui permettrait d'obtenir de nouveaux résultats à comparer à ceux de cette étude afin d'en évaluer la représentativité ;
- situé sur un territoire différent, impliquant peut être une réglementation ou des données météorologiques différentes ;
- accueillant une autre fonction (bureau, école, commerce...), avec les exigences qui s'y rapportent ;
- présentant une typologie différente (maison 3 ou 4 façades, appartement, immeuble...).

Au niveau de la deuxième partie, des scénarios complémentaires pourraient être explorés : isolation écologique, chaudière à pellet, panneaux solaires thermiques... Les scénarios pourraient également être construits en tenant directement compte des primes Habitation accordées par la Région wallonne. Ces primes sont accordées selon certaines conditions, à certains types de travaux et selon certains barèmes de montants. Tous ces critères peuvent influencer la composition de projet de rénovation. Enfin, l'étude de sensibilité pourrait être perfectionnée en incluant plus de variables (par exemple, la valeur λ des isolants) ou en décomposant davantage les scénarios (isolation étudiée pour les quatre types de parois : toitures, façades, plafond vers combles et plancher sur cave). L'étude de sensibilité pourrait même être poussée vers une optimisation des scénarios en faisant évoluer certaines variables pour déterminer les valeurs qui offrent la meilleure rentabilité ou le meilleur équilibre surcoûts - gains.

Pour la troisième partie, le traitement des données pourrait s'intéresser à un autre paramètre de l'analyse du cycle de vie : l'impact environnemental des matériaux et équipements (extraction ou production, transport, mise en œuvre...). De même que les préoccupations pour la préservation de l'environnement

grandissent, il s'agit d'un aspect auquel la recherche s'intéresse de plus en plus. D'autant plus que, plus la performance énergétique du bâtiment s'améliore et la consommation d'énergie diminue, plus l'impact environnemental des fournitures prend de l'importance. (Energie Plus Le Site, 2021)

6 CONCLUSION

L'exploration du contexte environnemental et énergétique de ces dernières années a permis de mettre en évidence l'importance de la rénovation énergétique des logements en Wallonie pour atteindre les objectifs imposés par l'Europe.

Tous les ménages n'étant pas capables, financièrement, d'entreprendre un projet de rénovation énergétique de grande envergure, des aides (primes et prêts à taux zéro) sont mises à leur disposition par la Région wallonne. Mais constatant que le montant du prêt est limité à 60.000€, ce qui est insuffisant pour ce type de grosse rénovation, une question pouvait se poser :

« Pour une habitation wallonne en milieu urbain typique et un investissement financier initial de maximum 60.000€, quelles sont les mesures de rénovation à privilégier ? »

Menée en collaboration avec la plateforme locale de rénovation Liège-Énergie, cette recherche avait pour but d'améliorer l'expertise de ce type de structure, en leur proposant une étude d'impact de mesures de rénovation, avec des résultats concrets, sur laquelle s'appuyer pour conseiller et convaincre les particuliers de rénover.

Après une revue de la littérature minutieuse, une méthodologie a pu être élaborée puis mise en œuvre. La stratégie globale choisie était l'analyse d'un cas d'étude réel « archétype » par modélisation et simulation thermique dynamique. Cette méthodologie peut être résumée par les quatre objectifs opérationnels suivants :

- sélectionner un cas d'étude représentatif des logements wallons en milieu urbain à la performance énergétique très faible ;
- élaborer des scénarios combinant différentes mesures de rénovation en respectant un budget limité à 60.000€ et permettant d'atteindre in fine un label énergétique A ;
- étudier l'impact de ces scénarios sur quatre paramètres : consommation d'énergie, émissions de CO₂, surchauffe et coûts sur le cycle de vie ;
- réaliser une étude de sensibilité de ces quatre paramètres.

Une analyse détaillée de tous les résultats obtenus a ensuite permis de retirer les conclusions principales suivantes.

La mesure la plus efficace, tous paramètres d'étude confondus, est sans conteste l'isolation poussée de toutes les parois du logement (toitures, plafond vers combles, façades et plancher sur cave). Si le remplacement des menuiseries n'est pas tellement efficace en comparaison, les deux mesures restent complémentaires pour assurer une isolation optimale de l'enveloppe.

L'amélioration du système de chauffe existant par l'installation d'une PAC air-eau est également une mesure de grande efficacité énergétique. Mais il est indispensable de choisir un modèle performant et de l'associer à d'autres mesures (isolation, panneaux PV) si l'on veut éviter de grandes pertes sur le long terme.

L'ajout de panneaux PV en toiture a un impact restreint à la réduction de consommation d'électricité. Donc, plus la part d'électricité dans l'énergie totale consommée est importante, plus le potentiel d'économie d'énergie est haut (pour un nombre de panneaux non limité par la surface de toiture disponible). Grâce au prix élevé de l'électricité, il s'agit surtout d'une mesure qui a un bon potentiel de rentabilité pour peu que l'on choisisse des panneaux à haut rendement.

Pour rappel, les principaux résultats quantitatifs issus de cette étude peuvent être retrouvés au sein d'un document récapitulatif, présenté à l'Annexe 4.

À la suite d'une discussion des résultats, notamment à la lumière des remarques de Liège-Énergie, les découvertes tirées de cette étude ont pu être formulées :

- les mesures de rénovation diminuent la consommation d'énergie, réduisent les émissions de CO₂ en phase d'utilisation et améliorent le confort thermique, surtout en hiver ;
- les mesures d'isolation et de changement du système de chauffe sont les plus performants ;
- les projets de rénovation ne sont pas toujours rentables à moyen-terme (30 ans) mais la rentabilité augmente avec le temps ;
- les prix de l'énergie et leur évolution dans le temps influencent grandement la rentabilité d'un projet de rénovation et plus l'énergie sera chère, plus le projet sera rentable ;
- les coûts de maintenance et de remplacement sont non-négligeables et plus le projet de rénovation est élaboré (plusieurs équipements de type PAC, VMC, panneaux...), plus les coûts seront importants ;
- l'anticipation d'une tarification carbone est avantageuse pour les projets de rénovation et plus la tarification sera sévère, plus le projet sera rentable.

Cela a permis de mettre en évidence trois recommandations principales :

- bien composer les projets pour améliorer la performance et la rentabilité globale (certaines mesures sont complémentaires, voire indissociables) ;
- envisager tous les types de coûts lors d'une ACCV, même simplifiée, pour prendre en compte tous les déficits et gains potentiels ;
- se projeter au-delà du cadre réglementaire ou des recommandations actuelles.

L'impact de ce travail de recherche a également été projeté sur trois échelles de temps. Au moment même de la mise œuvre de l'étude, un contact est établi entre la plateforme de rénovation énergétique Liège-Énergie, représenté par son délégué à la gestion journalière M. Gedik, et le SDB Lab de l'Université de Liège, à travers le Pr Attia et moi-même. À court terme, les résultats issus de cette recherche peuvent aider la plateforme Liège-Énergie, ou d'autres structures offrant le même type de services, à améliorer leur service de conseil et d'accompagnement des candidats rénovateurs et en particulier, ceux intéressés par les prêts à taux zéro. À long terme, l'objectif ultime de ce type d'étude est, par la participation à une meilleure connaissance du sujet, d'encourager davantage de ménages wallons à rénover leur logement.

Pour finir, cette recherche pourrait être menée plus loin et permettre de nouvelles découvertes. Les principales pistes de modification qui ont été suggérées sont le choix d'un autre bâtiment « cas d'étude », l'exploration de nouveaux scénarios, la prise en compte immédiate des primes, l'amélioration de l'analyse de sensibilité et la prise en compte de l'impact environnemental des composants du projet.

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Part et évolution des secteurs dans les émissions totales de GES en 2019 (%)	1
Figure 1-2 : Croisement entre le degré d'urbanisation et l'âge des logements wallons.....	2
Figure 2-1 : Types d'instruments visant à stimuler la rénovation énergétique	11
Figure 2-2 : Exigences de la démarche EnergieSprong	11
Figure 2-3 : Labels et critères de certification pour le passif en Wallonie et à Bruxelles	13
Figure 2-4 : Exemple de certificat PEB.....	19
Figure 2-5 : Exigences PEB depuis le 11 mars 2021	19
Figure 2-6 : Types d'impact environnementaux et agents provocateurs	20
Figure 2-7 : Schéma conceptuel des impacts environnementaux en construction	21
Figure 2-8 : Schéma des parts de CO ₂ liées à un bâtiment.....	22
Figure 2-9 : Exemples de températures intérieures opératives recommandées	23
Figure 2-10 : Schéma des dépenses au cours de la vie d'un bâtiment	26
Figure 2-11 : Schéma de fonctionnement du logiciel DesignBuilder.....	28
Figure 2-12 : Résultats d'ACV et ACCV pour des systèmes de chauffage différents	31
Figure 2-13 : Coûts financiers (à gauche) et environnementaux (à droite) sur 60 ans pour l'ancien bâtiment, initiaux (IF) et sur le cycle de vie (LF).....	32
Figure 2-14 : Visuel des résultats	33
Figure 3-1 : Schéma méthodologique général.....	37
Figure 3-2 : Photo de la façade avant de l'habitation (briques rouges)	42
Figure 3-3 : Plans d'implantation de l'habitation	42
Figure 3-4 : Plans du RDC de l'habitation	43
Figure 3-5 : Plans du R+1 de l'habitation.....	43
Figure 3-6 (à gauche) : Coupe longitudinale de l'habitation	44
Figure 3-7 (à droite) : Coupe transversale de l'habitation.....	44
Figure 3-8 : Photo des installations de chauffage et de production d'ECS	44
Figure 3-9 : Détails de composition des parois isolées pour le scénario R0	52
Figure 3-10 : Détails de composition des parois isolées pour le scénario RI	53
Figure 3-11 : Évolution des prix de l'énergie en Wallonie entre 2010 et 2021, sur base des données d'Energie Commune (2021)	67
Figure 4-1 (gauche) : CB - Consommations d'énergie annuelles.....	70

Figure 4-2 (droite) : CB - Consommations d'énergie mensuelles	70
Figure 4-3 : CB - Émissions de CO ₂ annuelles	70
Figure 4-4 : CB - Températures opératives moyennes et extrêmes.....	70
Figure 4-5 (gauche) : CB - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)	71
Figure 4-6 (droite) : CB - Coûts détaillés sur 30 ans.....	71
Figure 4-7 : CB - Répartitions des coûts de fonctionnement.....	71
Figure 4-8 (gauche) : R0 - Consommations d'énergie annuelles	72
Figure 4-9 (droite) : R0 - Consommations d'énergie mensuelles.....	72
Figure 4-10 : R0 - Émissions de CO ₂ annuelles.....	72
Figure 4-11 : R0 - Températures opératives moyennes et extrêmes	73
Figure 4-12 (gauche) : R0 - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC).....	73
Figure 4-13 (droite) : R0 - Coûts détaillés sur 30 ans	73
Figure 4-14 : R0 - Répartition des coûts d'investissement	74
Figure 4-15 (gauche) : R1 - Consommations d'énergie annuelles	75
Figure 4-16 (droite) : R1 - Consommations d'énergie mensuelles.....	75
Figure 4-17 : R1 - Émissions de CO ₂ annuelles	75
Figure 4-18 : R1 - Températures opératives moyennes et extrêmes	76
Figure 4-19 : R1 - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)	76
Figure 4-20 : R1 - Coûts détaillés sur 30 ans	77
Figure 4-21 : R1 - Répartition des coûts d'investissement.....	77
Figure 4-22 (gauche) : R2 - Consommations d'énergie annuelles.....	78
Figure 4-23 (droite) : R2 - Consommations d'énergie mensuelles	78
Figure 4-24 : R2 - Émissions de CO ₂ annuelles.....	78
Figure 4-25 : R2 - Températures opératives moyennes et extrêmes	79
Figure 4-26 : R2 - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC).....	79
Figure 4-27: R2 - Coûts détaillés sur 30 ans.....	80
Figure 4-28 : R2 - Répartition des coûts d'investissement	80
Figure 4-29 (gauche) : R3 - Consommations d'énergie annuelles	81
Figure 4-30 (droite) : R3 - Consommations d'énergie mensuelles.....	81
Figure 4-31 : R3 - Émissions de CO ₂ annuelles.....	81
Figure 4-32 : R3 - Températures opératives moyennes et extrêmes	82
Figure 4-33 : R3 - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)	82
Figure 4-34 : R3 - Coûts détaillés sur 30 ans	83
Figure 4-35 : R3 - Répartition des coûts d'investissement	83

Figure 4-36 (gauche) : RR - Consommations d'énergie annuelles	84
Figure 4-37 (droite) : RR - Consommations d'énergie mensuelles.....	84
Figure 4-38 : RR - Émissions de CO ₂ annuelles.....	84
Figure 4-39: RR - Températures opératives moyennes et extrêmes	85
Figure 4-40 : RR - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC).....	85
Figure 4-41: RR - Coûts détaillés sur 30 ans.....	86
Figure 4-42 : RR - Répartition des coûts d'investissement	86
Figure 4-43 (gauche) : R+ - Consommations d'énergie annuelles.....	87
Figure 4-44 (droite) : R+ - Consommations d'énergie mensuelles	87
Figure 4-45 : R+ - Émissions de CO ₂ annuelles	87
Figure 4-46 : R+ - Températures opératives moyennes et extrêmes.....	88
Figure 4-47 (gauche) : R+ - Coûts totaux sur 30 ans (hors TC)	88
Figure 4-48 (droite) : R+ - Coûts détaillés sur 30 ans.....	88
Figure 4-49 : R+ - Répartition des coûts d'investissement.....	89
Figure 4-50 : Comparaison des consommations d'énergie annuelles.....	89
Figure 4-51 : Comparaison des émissions de CO ₂ annuelles.....	90
Figure 4-52 (gauche) : Comparaison des températures opératives - confort d'été	91
Figure 4-53 (droite) : Comparaison des temps de surchauffe.....	91
Figure 4-54 : Comparaison des températures opératives - confort d'hiver.....	91
Figure 4-55 : Comparaison des coûts totaux sur 30 ans (hors TC).....	92
Figure 4-56 : Comparaison des coûts détaillés sur 30 ans.....	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Etudes d'impact résultant de la rénovation énergétique de logements	29
Tableau 3-1 : Grille de critère de sélection du cas d'étude	39
Tableau 3-2 : Réponses aux critères de sélection des quatre dossiers potentiels..	40
Tableau 3-3 : Détails des relevés de consommation du cas d'étude.....	47
Tableau 3-4 : Résultats de la dernière simulation du modèle calibré.....	48
Tableau 3-5 : Détail des variables.....	50
Tableau 3-6 : Caractéristiques générales des scénarios	51
Tableau 3-7 : Détails des coûts d'investissement des scénarios	55
Tableau 3-8 : Détails du scénario R0 en modification du CB.....	55
Tableau 3-9 : Détails du scénario RI en modification du scénario R0	56
Tableau 3-10 : Détails du scénario RM en modification du scénario R0	57
Tableau 3-11 : Détails du scénario RS en modification du scénario R0.....	57
Tableau 3-12 : Détails du scénario RR en modification du scénario R0	58
Tableau 3-13 : Détails du scénario R+ en modification du CB	58
Tableau 3-14 : Détail de l'étude de sensibilité.....	61
Tableau 3-15 : Détail des paramètres étudiés	63
Tableau 3-16 : Données de maintenance et remplacement des éléments de construction	66

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIE

- Allacker, K., Troyer, F., Spirinckx, C., Vercalsteren, A., & Geerken, T. (2011). *Sustainability, financial and quality evaluation of dwelling types - « Sufiquad »* (p. 107). Science for a Sustainable Development. https://www.academia.edu/21828782/Science_for_a_Sustainable_Development_SD_
- Altensis. (2015). *DesignBuilder Software*. Altensis. <https://www.altensis.com/en/services/designbuilder-software/>
- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings* (p. 32-43). ASHRAE. http://www.eepperformance.org/uploads/8/6/5/0/8650231/ashrae_guideline_14-2002_measurement_of_energy_and_demand_saving.pdf
- Batisim. (2018). *DesignBuilder*. Batisim. <https://www.batisim.net/designbuilder.html>
- Boza-Kiss, B., & Bertoldi, P. (2018). *JCR Science for policy report : One-stop-shops for energy renovations of buildings* (p. 69). Commission Européenne. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc113301_jrc113301_reportononestopshop_2017_v12_pubsy_science_for_policy_.pdf
- Bruxelles Environnement. (2020). *Renolution : Une stratégie pour rénover le bâti bruxellois*. Bruxelles Environnement. <https://environnement.brussels/thematiques/batiment-et-energie/bilan-energetique-et-action-de-la-region/renolution-une-strategie-pour-renover-le-bati-bruxellois>
- CCERCB. (2021). *Aperçu des différents instruments visant à stimuler la rénovation énergétique*. CCERCB. <https://www.ccecrb.fgov.be/p/fr/813/apercu-des-differents-instruments-visant-a-stimuler-la-renovation-energetique>
- CERDD. (2021). *La démarche de rénovation à zéro énergie garantie EnergieSprong*. Centre ressource du développement durable. <http://www.cerdd.org/Parcours-thematiques/Changement-climatique/Initiatives-changement-climatique/La-demarche-de-renovation-a-zero-energie-garantie-EnergieSprong>
- Charlot-Valdieu, C., & Outrequin, P. (2018). *Réhabilitation énergétique des logements* (2ème édition). Éditions du Moniteur.
- Climat. (2018). *Débat national sur la tarification du carbone*. Climat. <https://climat.be/politique-climatique/belge/nationale/tarification-du-carbone>
- Climat. (2019). *Émissions par secteur*. Climat. <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/emissions-des-gaz-a-effet-de-serre/emissions-par-secteur>

- Climate.Onebuilding. (s. d.). *Climatewebsite–WMO Region 6 Europe–BEL Belgium*. Consulté 3 décembre 2021, à l'adresse https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/BEL_Belgium/index.html
- Comparateur Energie. (2020). *L'entretien de votre chaudière au gaz*. Comparateur Energie. <https://www.comparateur-energie.be/blog/entretien-chaudiere-gaz/>
- Conseil central de l'économie. (2019). *L'instauration d'une tarification carbone en Belgique* (p. 9). Conseil central d'économie. https://www.ccecrb.fgov.be/dpics/fichiers/2019-04-19-03-54-32_L%E2%80%99INSTAURATION_D%E2%80%99UNE_TARIFICATION_CARBONE_EN_BELGIQUE.pdf
- CREG. (2021). *Analyse semestrielle de l'évolution des prix de l'énergie–1er semestre 2021*. CREG. <https://www.creg.be/sites/default/files/assets/Prices/EvolPrFR.pdf>
- Depover, A. (2021). *Méthodologie pour une rénovation neutre en CO2* (p. 24). Cenergie NV - Université d'Anvers. https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/sem08-210326-7-ad-fr_20210315.pdf
- Effinergie. (2021). *Label BBC-Effinergie Rénovation ou Effinergie Rénovation*. Effinergie. https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/2930/20211216regles-technique.pdf
- Ekström, T., Bernardo, R., & Blomsterberg, Å. (2018). Cost-effective passive house renovation packages for Swedish single-family houses from the 1960s and 1970s. *Energy and Buildings*, 161, 89-102.
- Energie Commune. (2021). *Prix de l'énergie*. Energie Commune. <https://energiecommune.be/statistique/prix-energie/>
- Energie Plus Le Site. (2007a). *Conductivité thermique des matériaux (λ)*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/conductivite-thermique-des-materiaux/>
- Energie Plus Le Site. (2007b). *Emissions de polluants liées à la consommation énergétique*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/les-emissions-de-polluants-liee-a-la-consommation-energetique/>
- Energie Plus Le Site. (2007c). *Pompes à chaleur*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-par-pompe-a-chaaleur2/pompes-a-chaaleur-d2/>
- Energie Plus Le Site. (2007d). *Récapitulatif des caractéristiques des vitrages*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/donnees/enveloppe44/enveloppe2/recapitulatif-des-caracteristiques-des-vitrages/>
- Energie Plus Le Site. (2010a). *Photovoltaïque : Types de cellules*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules/>

- Energie Plus Le Site. (2010b). *Rendement et puissance crête des cellules photovoltaïques*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/rendement-et-puissance-crete-des-cellules-photovoltaiques/>
- Energie Plus Le Site. (2011a). *Besoin net en énergie*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/le-besoin-net-en-energie/>
- Energie Plus Le Site. (2011b). *Consommation en énergie primaire*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/la-consommation-en-energie-primaire/>
- Energie Plus Le Site. (2011c). *Consommation finale en énergie*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/la-consommation-finale-en-energie/>
- Energie Plus Le Site. (2014). *Norme NBN EN 15251:2007–Critères d’ambiance intérieure*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/reglementations/confort44/norme-nbn-en-15251-2007-criteres-d-ambiance-interieure/>
- Energie Plus Le Site. (2018). *Étanchéité à l’air dans le cadre d’une transformation*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/etudes-de-cas/enveloppe3/etancheite-a-l-air-dans-le-cadre-d-une-transformation/>
- Energie Plus Le Site. (2021). *La démarche “Bâtiment zéro carbone”*. Energie Plus Le Site. <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/la-demarche-batiment-zero-carbone/>
- EnergieSprong France. (s. d.). *EnergieSprong : Déployer à sa grande échelle des rénovations zéro-énergie garantie*. EnergieSprong France. Consulté 5 janvier 2022, à l’adresse <http://www.energiesprong.fr/>
- EnergyPlus. (s. d.). *EnergyPlus*. EnergyPlus. Consulté 24 octobre 2021, à l’adresse <https://energyplus.net/>
- Engie. (2019). *Mythes sur les panneaux solaires : Combien ça coûte au final ?* Engie. <https://www.engie.be/fr/blog/panneaux-solaires/5-questions-dargent-sur-les-panneaux-photovoltaiques/>
- EUR-Lex. (2021). *Directive 2010/31/UE sur la Performance énergétique des bâtiments*. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aen0021>
- Filippidou, F., Nieboer, N., & Itard, L. (2016). *Actual Energy Savings of Renovated Dwellings: the Case of Amsterdam* (p. 12). Conference: CLIMA 2016 12th REHVA World Congress. <https://vbn.aau.dk/en/publications/clima-2016-proceedings-of-the-12th-rehva-world-congress-volume-1>
- Galimshina, A., Moustapha, M., Hollberg, A., Padey, P., Lasvaux, S., Sudret, B., & Habert, G. (2021). What is the optimal robust environmental and cost-effective solution for building renovation ? Not the usual one. *Energy and Buildings*, 251, 111329.

Gaudiaut, T. (2021). *Infographie : Le prix de l'électricité en Europe*. Statista Infographies. <https://fr.statista.com/infographie/11825/comparaison-cout-electricite-en-europe/>

Guide Bâtiment Durable. (2013). *Dossier–Le cycle de vie de la matière : Analyse, sources d'information et outils d'aide au choix*. Guide Bâtiment Durable. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/le-cycle-de-vie-de-la-matiere-analyse-sources-d-information-et-outils-d-aide-au-choix.html?IDC=89&IDD=6030>

Guide Bâtiment Durable. (2018). *Dispositif–Analyse du coût sur le cycle de vie*. Guide Bâtiment Durable. <http://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/analyse-du-cout-sur-le-cycle-de-vie.html?IDC=10488&IDD=17155>

Guide Bâtiment Durable. (2020). *Exigence surchauffemax–Vademecum réglementation travaux PEB*. <http://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/exigence-surchauffemax.html?IDC=10875&IDD=22582>

Guide Pompe à Chaleur. (2014). *L'entretien d'une pompe à chaleur*. Guide Pompe à Chaleur. <https://www.guide-pompe-chaleur.be/l-entretien-dune-pompe-a-chaleur/>

Hauglustaine, J.-M., & Simon, F. (2018). *La rénovation et l'énergie–Guide pratique pour les architectes* (p. 140). Wallonie Énergie SPW. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/guide-bleu-renovation-optimise.pdf?IDR=41650>

Huang, J., Wang, S., Teng, F., & Feng, W. (2021). Thermal performance optimization of envelope in the energy-saving renovation of existing residential buildings. *Energy and Buildings*, 247, 111103.

ISO. (2005a). *ISO 7730:2005–Ergonomie des ambiances thermiques–Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/91/39155.html>

ISO. (2006b). *ISO 14040:2006–Management environnemental–Analyse du cycle de vie–Principes et cadre*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html>

ISO. (2006c). *ISO 14044:2006–Management environnemental–Analyse du cycle de vie–Exigences et lignes directrices*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/03/84/38498.html>

ISO. (2017). *ISO 15686-5:2017–Bâtiments et biens immobiliers construits–Prévision de la durée de vie–Partie 5 : Approche en coût global*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/06/11/61148.html>

La Maison Passive. (2019). *Critères pour la labellisation bâtiment passif*, EnerPHit et BaSE (p. 34). La Maison Passive. <https://www.lamaisonpassive.fr/wp-content/uploads/2021/05/CriteresDeCertification-mai-2021.pdf>

Liang, W. (2021). Long-term indoor formaldehyde variations and health risk assessment in Chinese urban residences following renovation. *Building and Environment*, 206, 108402.

Liège-Énergie. (s. d.-a). *Liège-Énergie—A propos*. Liège-Énergie. Consulté 11 octobre 2021, à l'adresse <https://www.liegeenergie.be/a-propos>

Liège-Énergie. (s. d.-b). *Primes et prêts à taux réduit de la Wallonie via l'accompagnement de Liège-Énergie*. Liège-Énergie. Consulté 12 octobre 2021, à l'adresse <https://www.liegeenergie.be/primesprets/>

Livos. (s. d.). *Le bon éclairage dans chaque pièce—Éclairage*. Livios. Consulté 13 décembre 2021, à l'adresse <https://www.livos.be/fr/info-construction/finitions/eclairage/le-bon-eclairage-dans-chaque-piece/>

Livos. (2017). *Quel est le niveau isolant de vos châssis ? - Portes et fenêtres*. Livios. <https://www.livos.be/fr/info-construction/gros-oeuvre/menuiserie-exterieure/portes-et-fenetres/quel-est-le-niveau-isolant-de-vos-chassis/>

Maison Passive pmp. (2019). *Les nouveaux labels de certification avec le PHPP*. Maison Passive pmp. https://www.maisonpassive.be/IMG/pdf/nouveaux_labels.v10.pdf

Maison Passive pmp. (2020a). Les primes d'aide à la rénovation énergétique. *Expresso*, 17, 3-8.

Maison Passive pmp. (2020b). Les stratégies de rénovation à Bruxelles et en Wallonie. *Expresso*, 15, 3-10.

Maison Passive pmp. (2021). Le passif : Rétrospectives et perspectives. *Expresso*, 20, 6-7.

Minergie. (2020). *Modèles de rénovation Minergie : Rénover plus simplement et pour plus de confort* (p. 5). Minergie. https://www.minergie.ch/media/2020-02-29_flyer_minergie_systemerneuerungen_fr_e-pdf.pdf

Monfils, S., & Hauglustaine, J.-M. (2011). *Using a DNA building code to manage the housing stock energy performance* (p. 8). EnergySuD - Université de Liège. <http://hdl.handle.net/2268/96986>

NBN. (2012). *Norme NBN EN 15978:2012—Contribution des ouvrages de construction au développement durable—Evaluation de la performance environnementale des bâtiments—Méthode de calcul*. NBN. https://www.nbn.be/shop/fr/norme/nbn-en-15978-2012_6226/

Nguyen, U. (2021). *Prix de l'énergie en Belgique : Vers une nouvelle augmentation?* Comparateur Energie. <https://www.comparateur-energie.be/blog/augmentation-prix-energie-belgique/>

Österbring, M., Mata, É., Thuvander, L., & Wallbaum, H. (2019). Explorative life-cycle assessment of renovating existing urban housing-stocks. *Building and Environment*, 165, 106391.

- Palma, P., Gouveia, J. P., & Barbosa, R. (2022). How much will it cost ? An energy renovation analysis for the Portuguese dwelling stock. *Sustainable Cities and Society*, 78, 103607.
- Pardalis, G., Talmar, M., & Keskin, D. (2021). To be or not to be : The organizational conditions for launching one-stop-shops for energy related renovations. *Energy Policy*, 159, 112629.
- Passive House Intitute. (2016). *Criteria for ther Passive House EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard*. Passive House Institute.
https://passiv.de/downloads/03_building_criteria_en.pdf
- Plan Bâtiment Durable. (2021). *Accueil–Plan Bâtiment Durable*.
<http://www.planbatimentdurable.fr>
- PNEC. (s. d.). *Plan national énergie climat PNEC*. Plan national énergie climat. Consulté 21 octobre 2021, à l'adresse
<https://www.plannationalenergieclimat.be/fr/le-pnec-c-est-quoi>
- Psomas, T., Heiselberg, P., Duer, K., & Andersen, M. (2016). Comparison and statistical analysis of long-term overheating indices applied on energy renovated dwellings in temperate climates. *Indoor and Built Environment*, 27.
<https://doi.org/10.1177/1420326X16683435>
- Reiter, S. (2010). *Life Cycle Assessment of Buildings - a review* (p. 19). Université de Liège. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/96541/1/Paper-Reiter-2010.pdf>
- Rose, J., Kragh, J., & Nielsen, K. F. (2022). Passive house renovation of a block of flats - Measured performance and energy signature analysis. *Energy and Buildings*, 256, 111679.
- Singh, M. K., Mahapatra, S., & Teller, J. (2014). Relation between indoor thermal environment and renovation in liege residential buildings. *Thermal Science*, 18(3), 889-902.
- SPF Finances. (2015). *Rénovation–Taux réduit de TVA*. SPF Finances.
<https://finances.belgium.be/fr/particuliers/habitation/renovation>
- SPW. (2021a). *Obtenir une prime pour son habitation*. Wallonie SPW.
<https://www.wallonie.be/fr/demarches/obtenir-une-prime-pour-son-habitation-partir-du-1er-juin-2019>
- SPW. (2021b). *RENO+ : Un projet pilote pour accélérer la rénovation de logements privés en Wallonie*. Philippe HENRY - Ministre du climat.
<http://henry.wallonie.be/cms/render/live/fr/sites/gw-henry/home/communiques--actualites/communiques-de-presse/presses/reno--un-projet-pilote-pour-acceler-la-renovation-de-logements-privés-en-wallonie.html>
- SPW Énergie. (s. d.). *Vente, location, publicité : Les bâtiments affichent leur consommation d'énergie*. Site énergie du Service public de Wallonie. Consulté 4 janvier 2022, à l'adresse <https://energie.wallonie.be/fr/certificat-peb-quoi-quand-comment.html?IDC=8777>
- SPW Énergie. (2016a). *Guide pratique : Rénover pour consommer moins d'énergie–Introduction* (p. 1-6). Secteur énergie du Service public de Wallonie.

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/1-guide-pratique-introduction.pdf?ID=61574>

SPW Énergie. (2016b). *Mon Quickscan*. Mon Quickscan. <https://monquickscan.be/>

SPW Énergie. (2017). *Exigences PEB & électromobilité à partir du 11 mars 2021*.

Site énergie du Service public de Wallonie.

<https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-electromobilite-a-partir-du-11-mars-2021.html?IDD=149405&IDC=7224>

SPW Énergie. (2018). *Projet pilote : Appel à candidature la mise en place de plateformes locales de rénovation énergétique*. Secteur énergie du Service public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/181009-appel-a-projets-platefome-renovation.pdf?ID=52169>

SPW Énergie. (2019). *L'Audit Logement : Le bon choix avant de rénover son habitation*. Site énergie du Service public de Wallonie.

<https://energie.wallonie.be/fr/l-audit-logement-le-bon-choix-avant-de-renover-son-habitation.html?IDC=6024&IDD=12051>

SPW Énergie. (2020a). *Directives européennes en matière de performance énergétique des bâtiments*. Site énergie du Service public de Wallonie.

<https://energie.wallonie.be/fr/directives-europeennes-en-matiere-de-performance-energetique-des-batiments.html?IDC=7224&IDD=97287>

SPW Énergie. (2020b). *Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment* (p. 235). Secteur énergie du Service public de Wallonie.

<https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/gw-201112-strategie-renovation-2020-rapport-complet-final.pdf?ID=60498>

SPW Énergie. (2021a). *Guichets Énergie Wallonie*. Site énergie du Service public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/fr/guichets-energie-wallonie.html?IDC=6946>

SPW Énergie. (2021b). *La réglementation wallonne–PEB*. Site énergie du Service public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/fr/reglementation-wallonne-sur-la-peb.html?IDC=7224>

SPW Énergie. (2021c). *Lancement d'un nouvel appel à projets pour le développement de plateformes locales de rénovation*. Site énergie du Service public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/fr/28-07-2021-lancement-d-un-nouvel-appel-a-projets-pour-le-developpement-de-plateformes-locales-de-renovation.html?IDD=153538&IDC=8230>

SPW Énergie. (2021d). *Le Guide PEB 2021*. Secteur énergie du Service public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/?ID=63062>

SWCS. (2019). *Rénover–Que proposons-nous ? Prêts à taux zéro*. SWCS - Société Wallonne du Crédit Social. <https://www.swcs.be/renover/que-proposons-nous/>

TOTEM. (2020). *Durées de vie dans TOTEM* (p. 1-12). TOTEM.

UPA. (2017). *Bordereau des prix unitaires–2017* (p. 29-90). Union Royale Professionnelle d'Architectes. <https://upa-bua-arch.be/fr/ressources/le-bordereau-des-prix-unitaires/bordereaux-des-prix-unitaires-2017>

Van Craenendonck, S., Lauriks, L., & Vuye, C. (2016). Energy Efficient Renovation of Belgian Houses : Sensitivity Analysis for Thermal Bridges. *Energy Procedia*, 96, 158-169.

Ventilation.be. (s. d.). *L'entretien d'une VMC*. Ventilation.be. Consulté 22 décembre 2021, à l'adresse <https://ventilation.be/entreprise-entretien-vmc-belgique/>

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

Vlaanderen. (2020). *Ik BENOveer*. Energiesparen. <https://www.energiesparen.be/ikbenoveer>

Wagelmans, P., Guillemau, J.-M., & Wagelmans, J. (2015). *Quelles informations dans le certificat PEB?* (p. 1-24). SPW Énergie. <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/quelles-informations-dans-le-certificat-peb-depuis-le-3-novembre-2014.pdf?ID=32423>

Walloreno. (s. d.). *Les primes Habitation, les conseils en prime!* SPW Énergie. Consulté 6 janvier 2021, à l'adresse <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/55659.pdf?ID=55659>

Walloreno. (2021a). *Guide pratique pour rénover votre logement avec Walloreno* (p. 40). Walloreno. <https://www.walloreno.be/assets/dist/documents/guide-pratique-pour-renover-votre-logement-avec-walloreno.pdf>

Walloreno. (2021b). *Walloreno—En route vers le label A*. Walloreno. <https://www.walloreno.be/fr/>

Wastiels, L. (2012). *Analyse du cycle de vie d'un bâtiment* (p. 51). CSTC.

Wastiels, L. (2018). *Détermination des performances environnementales des bâtiments à l'aide de l'outil TOTEM* (p. 2). CSTC. https://www.cstc.be/umbraco/Surface/PublicationItem/DownloadFile?file=31850%2Ffr%2Funprotected%2Fcstc_artonline_2018_2_no2_determination_des_performances_environnementales_des_batiments_a_l_aide_de_l_outil_TOTEM.pdf

ENTRETIENS

Entretien 1 avec Liège-Énergie (28 septembre 2021). Bases de collaboration

Entretien 2 avec Liège-Énergie (13 octobre 2021). Choix du cas d'étude

Entretien avec les propriétaires du cas d'étude (18 novembre 2021). Récolte de données complémentaires sur le cas d'étude.

ANNEXES

ANNEXE 1 - ABRÉVIATIONS UTILISÉES

Le tableau ci-dessous reprend, par ordre alphabétique, les abréviations utilisées dans ce travail ainsi que leur signification.

Abréviation	Signification
ACCV	Analyse du coût du cycle de vie
ACCV	Analyse du coût du cycle de vie
ACV	Analyse du cycle de vie
ACV	Analyse du cycle de vie
CoP	Coefficient de performance
CV(RMSE)	Coefficient of variation (root mean square error)
DE	Directive européenne
DR	Directive régionale
DV	Double vitrage
ECS	Eau chaude sanitaire
GES	Gaz à effet de serre
GES	Gaz à effet de serre
MBE	Mean bias error
PAC	Pompe à chaleur
PEB	Performance énergétique des bâtiments
PNEC	Plan national énergie climat
PUR	Polyuréthane
PV	Photovoltaïque (panneaux)
R	Résistance thermique
Sdb	Salle de bain
TC	Taxe carbone
TV	Triple vitrage
U	Coefficient de transmission thermique
VMC	Ventilation mécanique contrôlée
λ	Conductivité thermique

ANNEXE 2 – TABLEURS DE PARAMÉTRAGE DU MODÈLE

Quatre fichiers Excel ont été créés pour compiler les paramètres encodés dans le logiciel de simulation, un pour le cas de base calibré, un pour R0, un pour R+ et un pour les autres scénarios.

Le nom de ces fichiers est « TFE_Fanny Massotte_2022_Encodages [sigle du cas de base ou du scénario] »

ANNEXE 3 – TABLEUR DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Un fichier Excel unique a été créé pour compiler les données récoltées dans le logiciel, pour traiter de ces données calculs et pour produire les résultats attendus.

Le nom de ce fichier est « TFE_Fanny Massotte_2022_Résultats »

ANNEXE 4 – DOCUMENT RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS

Un document récapitulatif a été créé pour compiler les résultats obtenus.

Le nom de ce fichier est « TFE_Fanny Massotte_2022_Récapitulatif »