

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse des coûts optimaux pour une solution de rénovation de bâtiment de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020

Auteur : Benitte, Hugo

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master : ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en "urban and environmental engineering"

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/17773>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

—

Analyse des coûts optimaux pour une solution de rénovation de bâtiment de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020

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

Promoteur : Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury : Sébastien THOMAS
Emmanuel DUFRASNES
Sigrid REITER

Abstract

The objective of this thesis is to explore the possibilities of energy optimization for a post-World War II building located in Nantes, using the principles of the RE 2020 regulations. The research focuses on optimizing the building envelope, heating systems, and integrating photovoltaic solar energy.

The methodology employed includes using Design Builder software to conduct detailed simulations and evaluate the impact of different optimization strategies. Specific assumptions are formulated to ensure the reliability of the obtained results.

The main results of the study highlight the importance of optimizing the building envelope, heating systems, and utilizing solar energy to reduce energy consumption and CO₂ emissions. Detailed data analysis shows that significant improvements can be achieved by using high-performance insulation, efficient heating systems, and photovoltaic panels.

The conclusions of this research indicate that energy optimization of existing buildings according to the RE 2020 standards is economically viable and environmentally beneficial. Recommendations are formulated to guide policymakers and professionals in the industry in their efforts towards energy renovation.

Mots-clés : optimisation énergétique, bâtiments existants, enveloppe du bâtiment, systèmes de chauffage, panneaux photovoltaïques, RE 2020

Résumé

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'optimisation énergétique d'un bâtiment de l'après-seconde guerre mondiale situé à Nantes. Ce bâtiment représente un défi en termes d'efficacité énergétique en raison de ses caractéristiques et de son âge. Notre objectif principal est d'explorer les possibilités d'optimisation en utilisant les principes de la réglementation RE 2020, qui vise à réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ dans le secteur du bâtiment. Dans cette introduction, nous présentons le contexte du bâtiment, ses caractéristiques architecturales et les enjeux liés à son amélioration énergétique.

Le chapitre de la revue de littérature examine les travaux de recherche existants sur l'optimisation énergétique des bâtiments existants. Nous nous penchons sur les différentes stratégies et approches utilisées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, en mettant l'accent sur les études portant sur les bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale. Nous explorons les avancées technologiques, les pratiques de conception durable, les systèmes de chauffage et de refroidissement, ainsi que l'intégration de l'énergie solaire dans les bâtiments existants. Nous identifions les lacunes dans la recherche actuelle et soulignons les opportunités de recherche pour l'optimisation énergétique du bâtiment étudié.

Dans le chapitre de méthodologie, nous détaillons la méthodologie utilisée pour mener notre étude d'optimisation énergétique. Nous expliquons comment nous avons recueilli les données du bâtiment, y compris les caractéristiques de construction, les systèmes de chauffage et les consommations énergétiques. Nous décrivons ensuite l'utilisation du logiciel Design Builder pour effectuer des simulations détaillées du bâtiment, en prenant en compte les différentes variables telles que l'enveloppe du bâtiment, les systèmes de chauffage, l'éclairage, etc. Nous formulons également des hypothèses pour garantir la fiabilité des résultats et déterminer les scénarios d'optimisation à étudier.

Ce chapitre résultats présente les principaux résultats de notre étude d'optimisation énergétique. Nous présentons les performances énergétiques initiales du bâtiment, puis nous comparons les différentes stratégies d'optimisation mises en œuvre. Nous mettons en évidence l'impact de chaque stratégie sur la consommation d'énergie du bâtiment et les émissions de CO₂. Nous fournissons des données chiffrées, des graphiques et des tableaux pour illustrer ces résultats. Nous discutons des avantages économiques et environnementaux de chaque stratégie et identifions celles qui offrent les meilleurs résultats.

Dans la conclusion et la discussion, nous analysons les résultats obtenus et les confrontons aux objectifs fixés dans notre étude. Nous avons pu remarquer qu'un certain nombre de solutions sont optimales, mais il reste une question à se poser : sont-elles cohérentes avec le principe de rénovation. Nous discutons de l'efficacité des différentes stratégies d'optimisation énergétique et de leur applicabilité au

bâtiment étudié et nous obtenons que le choix des solutions dépend énormément du portefeuille des propriétaires. Nous formulons des recommandations pour les décideurs politiques, les professionnels du secteur et les propriétaires de bâtiments afin de guider leurs efforts de rénovation énergétique. Nous soulignons également l'importance de l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes de chauffage et de l'utilisation de l'énergie solaire dans la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂. En conclusion, cette étude démontre que l'optimisation énergétique des bâtiments existants est réalisable selon les normes de la réglementation RE 2020, et qu'elle offre des avantages significatifs sur les plans économique et environnemental.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier chaleureusement M. Shady ATTIA, pour son soutien, pour sa compréhension, pour son accompagnement tout au long de mon TFE et surtout son aide qui a été d'une très grande richesse.

J'aimerais aussi remercier les membres du SBD Lab, pour l'organisation et le prêt d'un ordinateur puissant me permettant de réaliser mes recherches et de les effectuer plus rapidement.

De même, je souhaite remercier les membres de mon jury M. Sébastien THOMAS, M. Emmanuel DUFRASNES et Mme. Sigrid REITER pour le temps consacré à la lecture de cette étude. Et j'aimerais remercier tout particulièrement M. Sébastien THOMAS, pour l'aide et les échanges que nous avons pu avoir durant la réalisation de mon TFE.

Finalement, je souhaite remercier ma famille et ma conjointe, pour le soutien continu apporté tout au long de mon TFE.

Abréviations/Acronymes

SBD Lab	Sustainable Building Design Laboratory
PAC	Pompe à chaleur
ACV	Analyse du Cycle de Vie
eq CO ₂	Équivalent CO ₂
GES	Gaz à effet de serre
vol/h	Volume par heure
RE 2020	Réglementation Environnementale

Sommaire

Abstract	2
Résumé	3
Remerciements	5
Abréviations/Acronymes	6
Sommaire	7
Liste des Figures	11
Liste des Tableaux	12
1 Introduction	13
1.1 <i>Informations de base et énoncé du problème</i>	13
1.2 <i>Pertinence du sujet de recherche</i>	13
1.3 <i>Objectifs de recherche</i>	13
1.4 <i>Question de recherche principale et sous-questions de recherche</i>	14
2 État de l’art	16
2.1 <i>RE 2020</i>	16
2.1.1 <i>Les objectifs de la RE2020</i>	16
2.1.2 <i>Les exigences de la RE2020</i>	17
2.1.3 <i>Les solutions pour atteindre les exigences de la RE2020</i>	22
2.1.4 <i>Les limites de la RE2020</i>	22
2.2 <i>Études similaires</i>	22
3 Méthodologie	24
3.1 <i>Description de la conception et des méthodes de recherche</i>	24
3.2 <i>Processus du travail</i>	25
3.3 <i>Choix du logiciel</i>	27
3.4 <i>Mise en œuvre : variables, indicateurs</i>	28
3.4.1 <i>Variables à étudier</i>	28
3.4.2 <i>Indicateurs</i>	30
3.5 <i>Récolte et traitement des données</i>	32
3.6 <i>Hypothèses générales</i>	32
3.7 <i>Limites de l’étude</i>	35
3.7.1 <i>Les données</i>	35
3.7.2 <i>Géographie</i>	36
3.7.3 <i>Méthodologie</i>	36
3.7.4 <i>Objectivité</i>	36
3.8 <i>Critère de qualité</i>	37

4	Cas d'étude	38
4.1	<i>Sélection d'une typologie</i>	38
4.2	<i>Présentation du cas d'étude</i>	39
4.2.1	Origine du cas d'étude	39
4.2.2	Détails de la typologie A	40
4.2.3	Adaptation de la typologie A aux besoins de l'étude	49
5	Scénarios de rénovations	50
5.1	<i>Scénarios de rénovation des murs extérieurs</i>	50
5.1.1	Considérations générales	50
5.1.2	Laine de verre	50
5.1.3	Laine de bois.....	51
5.1.4	Laine de roche.....	52
5.1.5	Polystyrène extrudé	53
5.1.6	Polyuréthane	54
5.1.7	Ouate de cellulose.....	55
5.2	<i>Scénarios de rénovation de la toiture</i>	55
5.2.1	Considérations générales	55
5.2.2	Laine de verre	56
5.2.3	Laine de bois.....	57
5.2.4	Laine de roche.....	57
5.2.5	Polystyrène extrudé	59
5.2.6	Polyuréthane	60
5.2.7	Ouate de cellulose.....	61
5.3	<i>Scénarios de remplacement du système de chauffage.....</i>	62
5.3.1	Considérations générales	62
5.3.2	Chaudière électrique	62
5.3.3	Chaudière à gaz	63
5.3.4	Radiateur électrique	64
5.3.5	Air conditionné	64
5.3.6	Pompe à chaleur Air/Eau.....	64
5.3.7	Pompe à chaleur géothermie Eau/Air.....	65
5.3.8	Pompe à chaleur géothermie Eau/Eau	65
5.4	<i>Scénarios d'ajout de panneaux photovoltaïques</i>	66
5.4.1	Considérations générales	66
5.4.2	Pas de panneaux	67
5.4.3	¼ de la toiture	67
5.4.4	½ de la toiture	67
5.4.5	¾ de la toiture	68
5.4.6	Totalité de la toiture	69
6	Résultats	70
6.1	<i>Résultat de l'optimisation par étape.....</i>	70
6.1.1	Résultat de l'optimisation de l'enveloppe.....	70
6.1.2	Résultat de l'optimisation du chauffage	71
6.1.3	Résultat de l'optimisation des panneaux photovoltaïques.....	73
6.1.4	Sélection des scénarios.....	74

6.1.5	Résultat de l'optimisation	75
6.2	Résultat de l'optimisation globale.....	81
7	Discussion	89
7.1	Rappel de l'objectif de l'étude	89
7.1.1	Reformulation des objectifs de l'étude et du contexte	89
7.1.2	Reformulation des hypothèses.....	90
7.1.3	Réponses aux questions de recherche.....	91
7.2	Conclusions et recommandations	93
7.2.1	Découvertes clés.....	93
7.2.2	Recommandations	96
7.3	Forces et limites de l'étude	96
7.3.1	Points forts de l'étude	96
7.3.2	Limitations et faiblesses de l'étude	97
7.4	Implications dans la pratique et dans des travaux futurs	98
7.4.1	Informers les décisions de rénovation.....	99
7.4.2	Guider les politiques de rénovation.....	99
7.4.3	Sensibilisation et formation	99
7.4.4	Validation des modèles et des résultats	99
7.4.5	Intégration de considérations temporaires	100
7.4.6	Analyse des aspects environnementaux et sociaux	100
7.4.7	Étude de cas approfondie.....	100
8	Conclusions	101
8.1	Conclusions générales.....	101
8.2	Suggestions pour des recherches ultérieures.....	102
8.2.1	Évaluation de l'impact des incertitudes	102
8.2.2	Intégration de considérations économiques et sociales.....	103
8.2.3	Approfondissement de l'analyse du cycle de vie	103
8.2.4	Analyse des obstacles et des incitations	103
8.2.5	Étude des aspects architecturaux et patrimoniaux.....	103
9	Références.....	105
	Annexe 1 : Appareils électroménagers que l'on trouve dans les maisons unifamiliales belges typiques de l'après-Seconde Guerre mondiale	110
	Annexe 2 : Intensité de la consommation d'énergie et émissions de carbone mesurées entre 2016 et 2019 pour l'archétype A à Wezembeek-Oppem, en Flandre	111
	Annexe 3 : Enquête et simulation de la consommation mensuelle d'électricité et de gaz de la typologie A.....	112
	Annexe 4 : Analyse paramétrique pour l'isolation des murs extérieurs	113
	Annexe 5 : Analyse paramétrique pour l'isolation de la toiture.....	115
	Annexe 6 : Analyse paramétrique pour les systèmes de chauffage.....	117

Annexe 7 : Analyse paramétrique pour les panneaux photovoltaïques	119
Annexe 7 : SBD Lab Poster	121

Liste des Figures

Figure 1-1 : Objectifs de développement durable des nations unies.....	14
Figure 2-1 : Schéma représentatif du besoin climatique.....	17
Figure 2-2 : Schéma représentatif de la consommation d'énergie primaire.....	19
Figure 2-3 : Schéma représentatif de la consommation d'énergie primaire non renouvelable.....	20
Figure 3-1 : Carte représentant les zones de la Typologie A.....	24
Figure 3-2 : Processus du travail.....	26
Figure 3-3 : Logo de Design Builder.....	27
Figure 4-1 : Photo représentant la typologie A de la maison unifamilial.....	40
Figure 4-2 : Schéma de la typologie du bâtiment.....	41
Figure 4-3 : Plans du bâtiment.....	42
Figure 4-4 : Façades du bâtiment.....	42
Figure 4-5 : Planning d'utilisation et de l'éclairage des pièces de la maison.....	45
Figure 4-6 : Détail de la consommation du bâtiment.....	46
Figure 4-7 : Détail de la consommation du bâtiment au m ²	46
Figure 4-8 : Consommation du bâtiment au m ² en fonction du mois de l'année.....	47
Figure 4-9 : Émission de CO ₂ en fonction du mois de l'année.....	48
Figure 4-10 : Pertes thermiques du bâtiment étudié.....	49
Figure 5-1 : Représentation de la laine de verre.....	50
Figure 5-2 : Représentation de la laine de bois.....	51
Figure 5-3 : Représentation de la laine de roche.....	52
Figure 5-4 : Représentation du polystyrène extrudé.....	53
Figure 5-5 : Représentation du polyuréthane.....	54
Figure 5-6 : Représentation de la ouate de cellulose.....	55
Figure 5-7 : Représentation de la laine de verre.....	56
Figure 5-8 : Représentation de la laine de bois.....	57
Figure 5-9 : Représentation de la laine de roche.....	58
Figure 5-10 : Représentation du polystyrène extrudé.....	59
Figure 5-11 : Représentation du polyuréthane.....	60
Figure 5-12 : Représentation de la ouate de cellulose.....	61
Figure 5-13 : Représentation de la surface PV 2 des panneaux photovoltaïques.....	67
Figure 5-14 : Représentation de la surface PV 3 des panneaux photovoltaïques.....	68
Figure 5-15 : Représentation de la surface PV 4 des panneaux photovoltaïques.....	68
Figure 5-16 : Représentation de la surface PV 5 des panneaux photovoltaïques.....	69
Figure 6-1 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et le CO ₂	75
Figure 6-2 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et l'énergie nette.....	78
Figure 6-3 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et le CO ₂	81
Figure 6-4 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et l'énergie nette.....	84
Figure 6-5 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour l'isolation des murs extérieurs.....	87
Figure 6-6 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour l'isolation de la toiture.....	87
Figure 6-7 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour les systèmes de chauffage.....	88

Figure 6-8 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour les panneaux photovoltaïques	88
---	----

Liste des Tableaux

Tableau 2-1 : Récapitulatif des Coefficient de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire	19
Tableau 2-2 : Récapitulatif des Coefficients de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire non renouvelable.....	21
Tableau 3-1 : Résumé des variables de l'étude.....	30
Tableau 3-2 : Indicateurs de l'étude	31
Tableau 3-3 : Composés des gaz à effet de serre	31
Tableau 4-1 : Récapitulatif des pièces.....	43
Tableau 4-2 : Composition des murs extérieurs.....	43
Tableau 4-3 : Composition de la toiture inclinée.....	44
Tableau 5-1 : Composition des murs extérieurs avec de la laine de verre	51
Tableau 5-2 : Composition des murs extérieurs avec laine de bois	51
Tableau 5-3 : Composition des murs extérieurs avec de la laine de roche.....	52
Tableau 5-4 : Composition des murs extérieurs avec du polystyrène extrudé.....	53
Tableau 5-5 : Composition des murs extérieurs avec du polyuréthane	54
Tableau 5-6 : Composition des murs extérieurs avec de la ouate de cellulose	55
Tableau 5-7 : Composition de la toiture avec de la laine de verre.....	56
Tableau 5-8 : Composition de la toiture avec laine de bois	57
Tableau 5-9 : Composition de la toiture avec de la laine de roche	58
Tableau 5-10 : Composition de la toiture avec du polystyrène extrudé.....	59
Tableau 5-11 : Composition de la toiture avec du polyuréthane.....	60
Tableau 5-12 : Composition de la toiture avec de la ouate de cellulose	61
Tableau 6-1 : Optimisation de l'enveloppe pour minimiser le coût total et le CO ₂	70
Tableau 6-2 : Optimisation de l'enveloppe pour minimiser le coût total et l'énergie nette	71
Tableau 6-3 : Optimisation du système de chauffage pour minimiser le coût total et le CO ₂	72
Tableau 6-4 : Optimisation du système de chauffage pour minimiser le coût total et l'énergie nette	72
Tableau 6-5 : Optimisation des panneaux photovoltaïques pour minimiser le coût total et le CO ₂	73
Tableau 6-6 : Optimisation des panneaux photovoltaïques pour minimiser le coût total et l'énergie nette	74
Tableau 6-7 : Récapitulatif des variables retenues pour l'optimisation finale.....	74
Tableau 6-8 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et le CO ₂	76
Tableau 6-9 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et l'énergie nette.....	79
Tableau 6-10 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et le CO ₂	82
Tableau 6-11 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et l'énergie nette.....	85
Tableau 6-12 : Tableau récapitulatif des résultats de l'optimisation globale.....	87
Tableau 7-1 : Récapitulatif de la solution optimale la moins couteuse	94
Tableau 7-2 : Récapitulatif de la solution optimale la plus couteuse	95

1 Introduction

1.1 Informations de base et énoncé du problème

Le problème de l'optimisation énergétique des bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale sera exploré tout au long de cette étude, nous nous concentrerons sur un bâtiment spécifique situé à Nantes. En prenant tous les secteurs en considération, le secteur du bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie. Ce secteur représenterait environ 40% de la consommation énergétique et 36% de l'émission de CO₂ dans l'Europe (BPIE, 2020). C'est pour cela que nous nous intéresserons à la réduction de l'énergie consommée et du CO₂ émis. Ces bâtiments, ayant des caractéristiques architecturales et un âge particulier, engendrent des défis particuliers en matière d'efficacité énergétique. Il sera essentiel de les rénover et de les adapter aux normes en vigueur pour atteindre les objectifs de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂.

1.2 Pertinence du sujet de recherche

La recherche sur l'optimisation énergétique des bâtiments existants a une grande importance tant sur le plan académique que pratique, le changement climatique a une très grande importance sur les ménages Belges (Attia, & Gobin, 2020), il se veut de même pour les citoyens français. D'un point de vue académique, les défis posés par les bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale permettent une amélioration des connaissances en fournissant de nouvelles solutions. Pour les décideurs politiques, les professionnels du secteur et les propriétaires de bâtiment, cette étude leur permet d'obtenir des recommandations concrètes, sur le plan pratique, et leur permettent donc de prendre des mesures efficaces pour améliorer la performance énergétique des bâtiments existants.

1.3 Objectifs de recherche

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Analyser les caractéristiques et les défis spécifiques liés à l'optimisation énergétique du bâtiment de l'après-seconde guerre mondiale à Nantes.
- Évaluer l'efficacité des différentes stratégies d'optimisation énergétique applicables à ce type de bâtiment.
- Quantifier l'impact de ces stratégies sur la consommation d'énergie du bâtiment et les émissions de CO₂.
- Obtenir les solutions les plus optimales pour la rénovation de ce type de bâtiment.

- Fournir des recommandations pratiques pour la rénovation énergétique du bâtiment étudié, ainsi que des lignes directrices plus générales pour les bâtiments similaires.

D'autres objectifs seront intéressants à introduire en les reliant au 17 objectifs de développement durable des nations unies, avec le 7 qui est l'énergie propre et d'un coût abordable et avec le 12 qui est une consommation et production responsables. (UDGS, 2015)

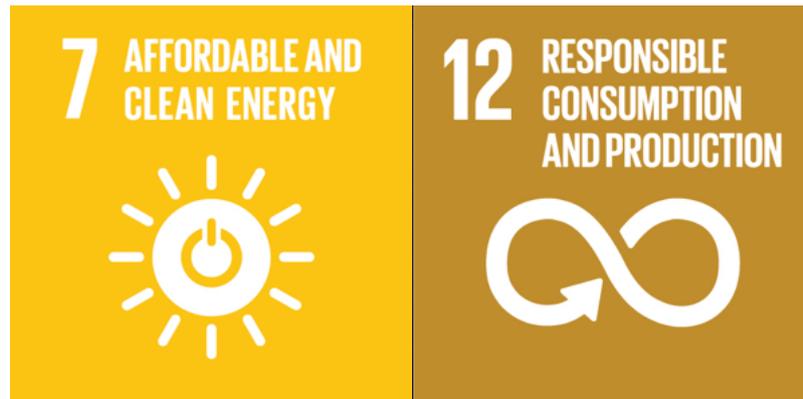


Figure 1-1 : Objectifs de développement durable des nations unies

Un dernier objectif se rapproche de notre étude et de nos objectifs serait celui qui regroupe les objectifs de neutralité climatique de l'UE à l'horizon 2050 pour la performance énergétique des bâtiments. (Europal , 2023)

1.4 Question de recherche principale et sous-questions de recherche

La question de recherche principale de cette thèse est la suivante :

Quelles sont les meilleures stratégies d'optimisation énergétique pour les bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale afin de réduire leur consommation d'énergie et leurs émissions de CO₂ selon la RE 2020 ?

Pour répondre à cette question, les sous-questions de recherche suivantes seront abordées :

- Quels sont les différents composants de rénovation ?
- Quelle est la meilleure stratégie de rénovation en prenant en compte seulement l'énergie et le coût ?
- Quelle est la meilleure stratégie de rénovation en prenant en compte seulement le CO₂ et le coût ?
- Quel est le composant le plus influant sur le coût, sur le CO₂, sur l'énergie pour rénover ce genre de bâtiment ?

En examinant ces questions de recherche, nous pourrions contribuer à une meilleure compréhension des défis et des solutions liés à l'optimisation énergétique des bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale, et fournir des recommandations pratiques pour améliorer leur performance énergétique et réduire leur impact environnemental.

2 État de l'art

2.1 RE 2020

Nous allons maintenant nous intéresser à la RE 2020 en détail d'après l'arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation. La RE 2020 est la réglementation thermique et environnementale pour les bâtiments neufs et les extensions en France. Cette réglementation a été mise en place en plusieurs parties. Tout d'abord à partir du 1^{er} janvier 2022 pour les bâtiments à destination de l'habitation, puis à partir du 1^{er} juillet 2022 pour les bâtiments à destination de bureaux ou de l'enseignement primaire et secondaire et finalement à partir du 1^{er} janvier 2023 pour les constructions provisoires. Cette réglementation s'applique dans tous les cas administratifs, c'est-à-dire que les travaux requièrent un permis, une déclaration préalable, ou rien de cela. Elle a pour objectif de favoriser la construction de bâtiments avec une performance énergétique haute et de réduire en même temps leur impact environnemental.

2.1.1 Les objectifs de la RE2020

Cette nouvelle réglementation, qui doit maintenant être respectée, a différents objectifs.

Le premier est comme nous avons pu le voir précédemment la réduction importante de l'impact des bâtiments neufs sur l'environnement. Pour cela différentes caractéristiques sont à prendre en compte, comme le cycle de vie du bâtiment dans son entièreté. Mais aussi, cela poussera à utiliser des modes de constructions nouveaux ou déjà existant avec une faible émission de CO₂ ou même qui permettraient de stocker le CO₂ à l'aide par exemple de matériaux biosourcés. Il n'y a pas que la construction qui est importante, mais aussi le fonctionnement du bâtiment après. Ainsi l'utilisation de sources d'énergie décarbonées, comme des énergies renouvelables sont vivement conseillées.

Le second objectif est la baisse de la consommation d'énergie des bâtiments neufs, ainsi que l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments. Un point est vraiment mis en avant, celui de l'isolation mise en place à l'aide de l'indicateur de besoin bioclimatique (Bbio) que l'on décrira plus précisément par la suite.

Finalement le dernier objectif est la bonne adaptation des habitations aux futures conditions climatiques. Pour décrire cet objectif, un paramètre a été mis en place, celui du confort d'été, qui permettra aux bâtiments de mieux résister pendant des

périodes de hautes températures qui ne font que s'intensifier et augmenter en fréquence.

2.1.2 Les exigences de la RE2020

Pour continuer sur cette réglementation environnementale, nous allons maintenant nous intéresser aux différentes exigences que doivent respecter les bâtiments neufs ou leurs extensions.

Des bornes à ne pas atteindre pour certains indicateurs de performances sont mises en place. Nous allons plus précisément nous intéresser à ceux du résidentiel.

Le Bbio est le premier indicateur, aussi présent dans la RT2012, qui a été retravaillé pour cette nouvelle réglementation. Il représente le besoin en chauffage, en refroidissement et en éclairage d'un bâtiment permettant de rester à une température convenable sans prendre en compte les systèmes énergétiques prévus dans le bâtiment. Il dépend de beaucoup d'éléments dans le bâtiment, sa conception architecturale, c'est-à-dire la compacité, l'orientation des ouvertures, l'éclairage naturel dans le bâtiment etc. Il dépend aussi d'autres paramètres, comme son enveloppe qui elle-même variera en fonction de l'étanchéité à l'air, de l'isolation ou même de l'inertie du bâtiment. Nous pouvons résumer le besoin climatique avec la Figure 2-1 (CEGIBAT, 2023).

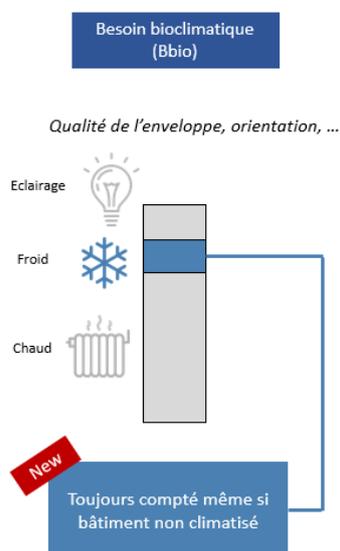


Figure 2-1 : Schéma représentatif du besoin climatique

Le calcul est assez simple (en points), il est défini ainsi :

$$Bbio = 2 \times \text{Besoin en Chauffage} + 2 \times \text{Besoin en Refroidissement} + 5 \times \text{Besoin en éclairage}$$

Pour la nouvelle réglementation RE 2020, il y a une différence notable avec la RT 2012, on prend en compte les besoins en refroidissement que le bâtiment soit climatisé ou non.

Il ne faudra pas que ce coefficient ne dépasse une valeur maximum :

- 63 points pour les maisons individuelles
- 65 points pour les logements collectifs

On peut faire une équivalence avec la RT 2012 même si le coefficient n'est pas exactement défini de la même façon, ce seuil est réduit de 20 à 30% par rapport à la précédente réglementation.

Un dernier point est à prendre en compte est celui de la localisation géographique, la surface des logements, des bâtiments, des combles aménagés et l'exposition au bruit.

Le Cep est le second indicateur, qui lui aussi était présent dans la RE 2012. Il représente la consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment. Il dépend des mêmes éléments que pour la RE 2012 : de la consommation pour le chauffage, le refroidissement, eau chaude sanitaire, l'éclairage et les auxiliaires de ventilation et de distribution. Cependant de nouveaux éléments viennent aussi s'intégrer pour la RE 2020, qui sont les consommations associées aux déplacements à l'intérieur du bâtiments des occupants, comme les ascenseurs ou escalators, l'éclairage et la ventilation des parties communes. La consommation forfaitaire de climatisation pour les bâtiments non climatisés se rajoute si un seuil d'inconfort d'été est dépassé. S'il y a production d'énergie électrique sur le site et qu'elle est autoconsommée alors elle est prise en compte dans le calcul (pas pour d'autres usages que pour le bâtiment, ex : mobiliers).

Le calcul reprend chaque élément présent ci-dessus (en kWh_{ep}/m²/an), c'est la somme des consommations conventionnelles d'énergie primaire du bâtiment, plus précisément la somme de chaque consommations multipliée par son coefficient de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire. Nous pouvons résumer la consommation d'énergie primaire avec la Figure 2-2 (CEGIBAT, 2023) et les coefficients de transformation de l'énergie entrants dans le bâtiment en énergie primaire représenté sur le Tableau 2-1.

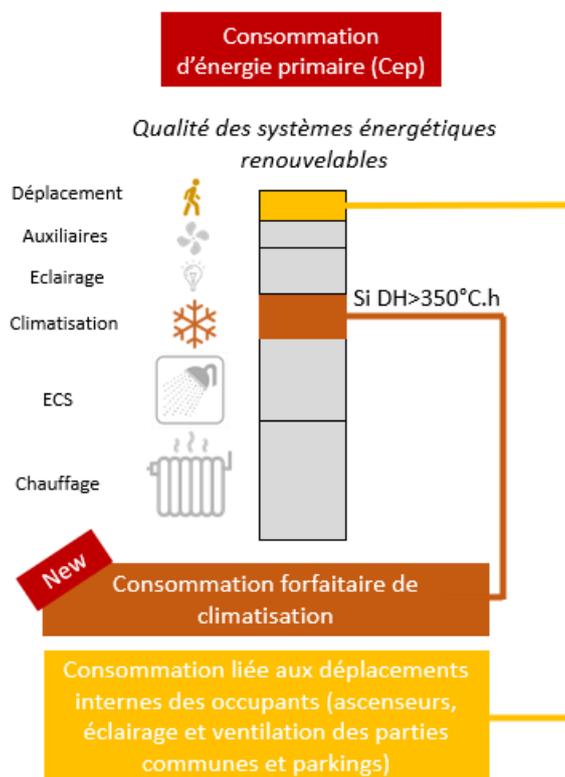


Figure 2-2 : Schéma représentatif de la consommation d'énergie primaire

Tableau 2-1 : Récapitulatif des Coefficient de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire

Type d'énergie importée dans le bâtiment	Coefficient de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire
Gaz naturel	1
Électricité	2,3
Fioul	1
Bois	1
Réseau de chaleur urbain (chauffage)	1
Réseau de chaleur urbain (refroidissement)	1
Autres énergies non renouvelables	0

Comme pour le précédent coefficient, il y a aussi une valeur seuil à ne pas dépasser :

- 75 kWhep/m²/an pour les maisons individuelles
- 85 kWhep/m²/an pour les logements collectifs

Un dernier point est à prendre en compte : celui de la localisation géographique, la surface des logements, bâtiments, combles aménagés et la catégorie de contraintes extérieures.

Il permet donc de limiter la consommation d'énergies renouvelables, qui n'est pas prise en compte dans l'indicateur que nous allons voir par la suite, le Cep,nr.

Le Cep,nr est le troisième indicateur, qui au contraire de son équivalent proche, le Cep, n'était pas présent dans la RE 2012. Il représente la consommation conventionnelle du bâtiment pour les mêmes usages que le Cep, cependant il ne prend qu'en compte la part non renouvelable d'énergie. Nous pouvons résumer la consommation d'énergie primaire non renouvelable avec la Figure 2-3 (CEGIBAT, 2023).

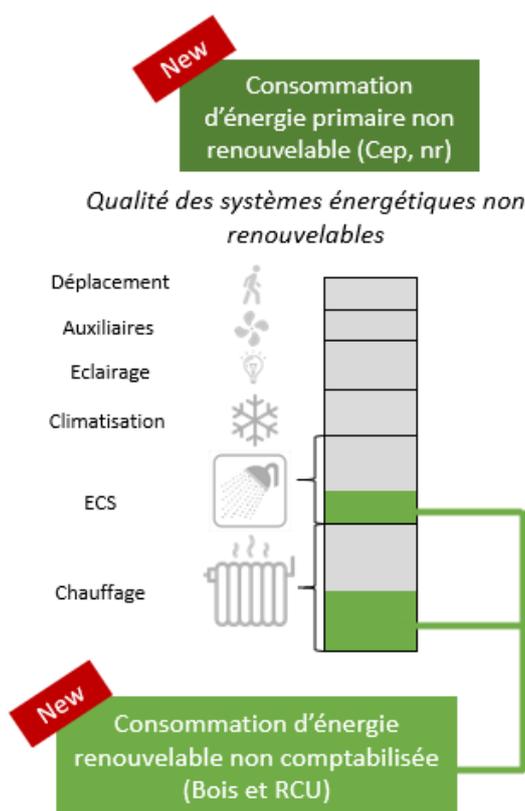


Figure 2-3 : Schéma représentatif de la consommation d'énergie primaire non renouvelable

Il est calculé de la même façon que le Cep, mais avec des coefficients de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment différent. Voici le récapitulatif de ces coefficients sur le Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Récapitulatif des Coefficients de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire non renouvelable

Type d'énergie importée dans le bâtiment	Coefficient de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire non renouvelable
Gaz naturel	1
Électricité	2,3
Fioul	1
Bois	1
Réseau de chaleur urbain (chauffage)	1 – Ratio d'énergie renouvelable ou de récupération du réseau
Réseau de chaleur urbain (refroidissement)	1
Autres énergies non renouvelables	0

Comme pour le précédent coefficient, il y a aussi une valeur seuil à ne pas dépasser :

- 55 kWhep/m²/an pour les maisons individuelles
- 70 kWhep/m²/an pour les logements collectifs

En mettant en parallèle la RE 2020 et la RT 2012, on observe donc une réduction de 15 à 20 % de ces valeurs.

Les derniers indicateurs sont des indicateurs de performance environnementale. Ils sont regroupés en trois catégories :

- Les indicateurs d'impacts sur le changement climatique
- Les indicateurs de stockage de carbone biogénique
- Les autres indicateurs environnementaux

2.1.3 Les solutions pour atteindre les exigences de la RE2020

Dans cette partie, nous allons découvrir les différentes solutions pour atteindre les attentes de la RE 2020. De nombreuses solutions existent pour construire des bâtiments avec une haute performance énergétique et environnementale, telles que:

- L'isolation thermique renforcée
- Le choix des équipements de chauffage, ventilation et climatisation performants
- L'utilisation de matériaux de construction écologiques
- La production d'énergie renouvelable sur place, comme les panneaux solaires, photovoltaïques ou les éoliennes

2.1.4 Les limites de la RE2020

Dans cette quatrième partie, nous allons aborder les limites de la RE 2020. Bien que cette réglementation soit un pas en avant dans la construction de bâtiments plus respectueux de l'environnement, elle comporte certaines limites. Par exemple, la RE 2020 ne s'applique qu'aux bâtiments neufs et ne prend pas en compte les bâtiments existants, qui représentent pourtant une part importante du parc immobilier en France.

Ce chapitre nous a permis de définir en détail la RE 2020, qui est la réglementation thermique et environnementale pour les bâtiments neufs en France. Nous avons vu que la RE 2020 est destiné aux bâtiments neufs, or dans notre cas, nous irons au de-là des limites de la RE 2020, en nous plaçant dans le cas d'une rénovation d'un bâtiment.

2.2 **Études similaires**

D'autres études ont pu être mené pour étudier de la même façon les facteurs qui influencent la rénovation en général en Belgique, comme dans toute l'Europe de l'Ouest (Ruellan, Cools & Attia 2021).

Il a aussi été nécessaire de caractériser des bâtiments proche du zéro énergie, qui eux n'ont presque pas de besoin d'énergie autre que celle produite sur site (Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet & Gulirmak, 2021). Ces bâtiments sont un seuil à atteindre pour être sûr de rester dans les bâtiments les plus efficaces des prochaines décennies.

Nous avons pu aussi mettre en parallèle des méthodologies de simulation multi-objectifs, comme celle que nous allons décrire par la suite, car c'est une méthodologie très proche de la nôtre (Amer, Hamdy, Wortmann, Mustafa & Attia, 2020), (Athienitis & Attia, 2010).

Nous pouvons aussi observer d'autres études réalisées sur la rénovation de bâtiments, mais celle-ci se base sur la rénovation de bâtiments mitoyen. Ce sont des bâtiments ayant comme objectif d'avoir besoin que de très peu d'énergie ou même d'aucune énergie extérieure (Attia, Canonge, Popineau & Cuchet, 2022).

3 Méthodologie

3.1 Description de la conception et des méthodes de recherche

Ce travail se concentrera sur une stratégie d'étude de cas pour l'optimisation de la performance énergétique d'une maison unifamiliale de l'après-Seconde Guerre mondiale, tout en se référant à la RE 2020. Nous utiliserons cette stratégie pour décrypter au mieux les différentes possibilités de rénovation qui sont envisageable. Elles permettront d'améliorer les performances énergétiques de ce bâtiment et donc de ce type de bâtiment, car il représente un type de bâtiment très présent dans le Nord-Ouest de l'Europe (Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet, & Gulirmak, 2021).



Figure 3-1 : Carte représentant les zones de la Typologie A

Nous nous plaçons dans une situation réelle pour réaliser notre cas d'étude, cela nous permettra de faire évoluer les connaissances sur une situation déjà connue. Ce choix a été fait pour utiliser un bâtiment modèle dans un logiciel de simulation, tout en faisant certaines hypothèses comme le fait que ce bâtiment est représentatif d'un certain nombre dans la région. Ce qui nous éviter de réaliser cette étude sur tous les bâtiments individuellement d'une ville, d'une région ou d'un pays.

Cette maison qui est décrite au Chapitre 4 est la base de notre étude, et elle sera exploitée grâce à un logiciel, Design Builder qui simulera certaines situations. C'est un logiciel de simulation dynamique, qui offre une interface graphique permettant de réaliser des actions qui ne sont pas toutes disponibles dans un autre logiciel. Il regroupe donc un nombre de fonctionnalités importantes, qui pourront dialoguer entre elles. Il est surtout capable de réaliser les fonctions qui vont nous intéresser les suivantes :

- Étude paramétrique
- Optimisation de paramètres

3.2 Processus du travail

Concernant le processus de notre travail, il peut être détaillé en plusieurs parties bien distinctes. La première est une partie importante, car c'est la base de notre étude, celle de l'examen littéraire. Elle permet de faire un état de ce qui existe et de ce qui a été fait dans la discipline que l'on s'apprête à travailler. Mais elle nous a aussi permis de trouver le modèle que nous allons étudier par la suite dans notre projet et finalement qui est bien la base de notre étude.

Après avoir récupéré ce modèle, qui est en fait un modèle du logiciel Design Builder déjà créé préalablement dans une précédente étude (Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet, & Gulirmak, 2021). Il sera donc intéressant de l'intégrer à notre logiciel pour permettre ensuite de faire un certain nombre de modifications et donc d'adapter cette maquette, ce modèle à notre étude. Après cela une étude préliminaire, via le logiciel Design Builder, nous permettra de déterminer les variables à travailler. C'est à la suite de cette sélection que l'on pourra faire travailler les variables, une par une, sur le modèle de façon indépendante et donc de réaliser une étude paramétrique de ces variables. Nous pourrons, grâce à cela, observer la réaction du modèle et bien comprendre son fonctionnement.

Si le modèle réagit comme on le souhaite, les étapes suivantes pourront suivre. Ces étapes peuvent se dissocier en 2 parties qui se feront en parallèle. La première est une optimisation par partie, c'est-à-dire que l'on réalisera une première optimisation de chacune des catégories de variable, afin d'en déterminer les plus optimales. Après la sélection de ces dernières variables, une optimisation finale permettra d'avoir un résultat assez rapide pour un grand nombre de variables de départ. On pourra donc observer un premier jet de combinaisons de variables optimales.

La seconde partie est celle d'une optimisation globale, elle consiste en l'optimisation de toutes les variables en une seule et même opération, cela est beaucoup plus long mais toutes les combinaisons sont parcourues.

On pourra donc finalement comparer ces différents résultats et voir si ces deux types d'optimisation sont équivalentes ou non. On obtiendra bien sûr un certain nombre de combinaisons qui seront une réponse aux questions posées tout au début de notre étude.

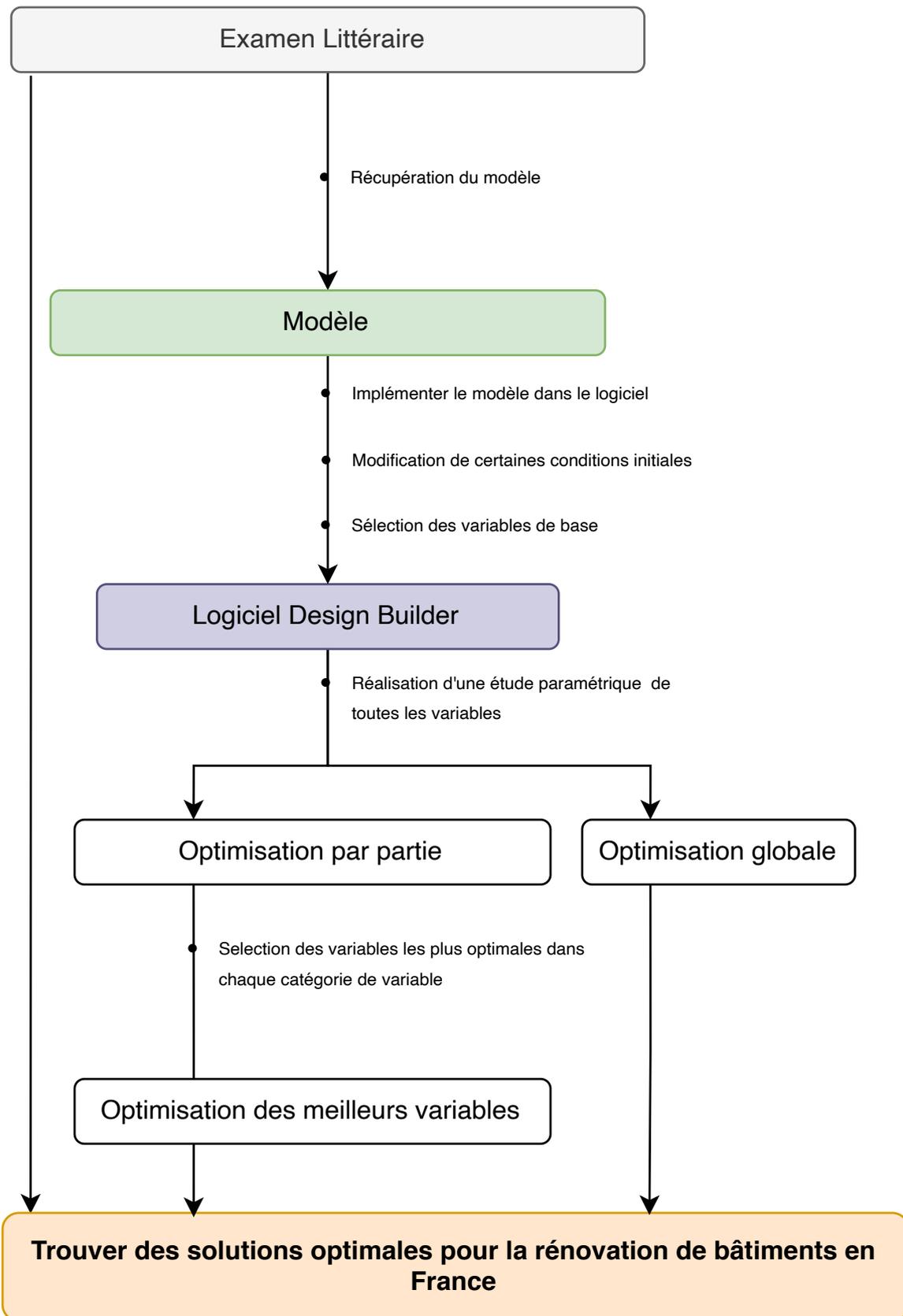


Figure 3-2 : Processus du travail

3.3 Choix du logiciel

Nous avons fait le choix de travailler avec Design Builder. D'une part car nous avons notre typologie de bâtiment qui avait déjà été réalisé sur ce logiciel dans une précédente étude (Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet, & Gulirmak, 2021), et d'une autre part l'utilisation du logiciel DesignBuilder présente plusieurs avantages significatifs dans le cadre de nos optimisations pour la rénovation d'un bâtiment. Voici quelques-uns des avantages clés que nous avons pu identifier.



Figure 3-3 : Logo de Design Builder

Nous bénéficions d'une modélisation détaillée de l'enveloppe du bâtiment. DesignBuilder nous permet de créer une représentation précise et détaillée de l'enveloppe thermique du bâtiment, en tenant compte de ses différentes composantes telles que les murs, les toitures, les planchers, les fenêtres, etc. Cette modélisation précise nous permet d'évaluer avec précision les performances thermiques du bâtiment dans différentes conditions.

Nous disposons d'une simulation dynamique et énergétique avancée. DesignBuilder offre des capacités de simulation avancées pour évaluer la consommation énergétique du bâtiment dans des scénarios variés. Il nous permet de prendre en compte des facteurs tels que les variations climatiques, les charges internes, les systèmes de chauffage et de refroidissement, les apports solaires, etc. Cela nous permet d'obtenir des résultats fiables et réalistes sur la performance énergétique du bâtiment.

Nous pouvons optimiser les paramètres de rénovation. DesignBuilder facilite l'optimisation des différents paramètres de rénovation que nous allons mentionnés, par la suite tels que le type et l'épaisseur de l'isolant, les systèmes de chauffage et la surface des panneaux photovoltaïques. Nous pouvons effectuer des simulations en variant ces paramètres et évaluer l'impact sur les performances énergétiques et les coûts du bâtiment, ce qui nous permettra de trouver les combinaisons les plus efficaces.

DesignBuilder intègre les normes et réglementations en vigueur, y compris les exigences de la RT 2012. Il n'intègre pas encore celle de la RE 2020, mais cela ne tardera pas en vue de la précédente intégration de la RT 2012.

Nous gagnons du temps et de l'efficacité. L'utilisation de DesignBuilder nous permet de gagner du temps et d'optimiser notre efficacité dans nos analyses. Le logiciel offre des fonctionnalités simples et des interfaces intuitives, facilitant la modélisation, la simulation et l'analyse des résultats. Cela nous permet de mener nos optimisations de manière plus rapide et efficace.

En utilisant DesignBuilder dans nos travaux d'optimisation pour la rénovation énergétique de notre bâtiment, nous bénéficions d'un outil puissant et spécialisé qui nous permet d'évaluer les performances thermiques, énergétiques et économiques de différentes solutions de rénovation. Cela nous permettra de prendre des décisions simplement et de recommander les meilleures stratégies de rénovation pour atteindre nos objectifs de performance énergétique et environnementale.

3.4 Mise en œuvre : variables, indicateurs

3.4.1 Variables à étudier

Pour la suite de notre étude, il sera nécessaire de sélectionner un grand nombre de variable pour pouvoir parcourir le maximum de solution possible et donc nous permettre de parcourir un spectre d'action le plus conséquent possible. Pour cela différentes catégories de variables seront mises en avant, les voici :

- Isolation des murs extérieurs
- Isolation de la toiture
- Système de chauffage
- Panneaux photovoltaïques

Tout d'abord l'isolation des murs extérieurs et l'isolation de la toiture, qui sont très importante dans la rénovation comme nous allons le voir plus précisément par la suite. De plus, nous pourrons aussi faire varier les systèmes de chauffage du bâtiment sélectionné, car si nous réduisons les pertes en améliorant l'isolation, il sera aussi intéressant de réduire les pertes et d'améliorer le rendement pendant la production. Finalement une dernière catégorie est celle des panneaux photovoltaïques qui est une des façons la plus simple de produire de l'énergie et donc de réduire efficacement la consommation d'un bâtiment sans avoir à réaliser une quantité de travaux trop importante.

Nous pouvons donc passer en revue chacune de ces quatre catégories. Pour sélectionner les isolants pour les murs extérieurs et pour la toiture, il sera nécessaire de prendre les isolants les plus utilisés en France (Ramier, 2021), (Toiture-couvreur, 2023) pour pouvoir les comparer entre eux. Nous sélectionnerons aussi leur coût pour la suite de l'étude en ne prenant en compte que le coût propre du produit (Prix-travaux-m2, 2023), (Zaffini, 2023), (Travaux.com, 2023), (Joarson, 2020), (Calculo, 2021). Pour cela, plusieurs recherches ont été réalisées, d'une part par internet pour obtenir différentes données qui sont listées dans les références et d'une autre part pour valider la donnée, nous avons interrogé un architecte et un cabinet d'ingénieur thermique. Nous pouvons donc sélectionner les différents isolants que nous allons étudier dans la suite de notre étude. Cette liste sera composée ainsi :

- La laine de verre
- La laine de bois
- La laine de roche
- Le polystyrène extrudé
- Le polyuréthane
- La ouate de cellulose

Pour ce qui est des systèmes de chauffage que nous allons pouvoir intégrer dans la rénovation du bâtiment, nous parcourons toutes les solutions les plus utilisées en France (Lacas, 2021), (Statista Research Department, 2023), allant des solutions à faible coût à des solutions demandant un coût d'achat beaucoup plus important. Ainsi on pourra sélectionner les systèmes suivants :

- La chaudières à gaz
- La chaudière à électricité
- Les radiateurs électriques
- Un système de chauffage par air conditionné
- Des pompes à chaleurs de différents types (échange avec l'air ou avec le sol pour la récupération de calories)

Enfin la dernière variable que nous allons pouvoir faire varier est le système de panneaux photovoltaïques qui seront fixés sur la toiture de l'habitation. Pour cette dernière variable, nous nous avons aussi dû fixer des caractéristiques de fonctionnement et un coût en fonction de nos recherches (Gonçalves, 2023), (Prix-travaux-m2, 2023), (ENGIE, 2023). Nous avons ici considéré que nous pourrions utiliser seulement qu'un pan de toiture pour les panneaux photovoltaïques, car seulement un pan pourra être bien orienté par rapport à la position du soleil. Nous avons ensuite voulu faire varier la surface utilisée de la toiture par quart. Voici donc les options que nous allons utiliser :

- Aucun panneau
- 1/4 De la toiture
- 1/2 De la toiture
- 3/4 De la toiture
- Totalité de la toiture

Voici le Tableau 3-1 permettant de résumer toutes les solutions que nous avons choisi de travailler dans notre étude.

Tableau 3-1 : Résumé des variables de l'étude

Isolant pour murs extérieurs	Isolant pour murs extérieurs	Système de chauffage	Panneaux photovoltaïques
Laine de verre	Laine de verre	Chaudière électrique	Aucun panneau
Laine de bois	Laine de bois	Chaudière à gaz Radiateur électrique	1/4 de la toiture
Laine de roche	Laine de roche	Air conditionné	1/2 de la toiture
Polystyrène extrudé	Polystyrène extrudé	Pompe à chaleur Air/Eau	3/4 de la toiture
Polyuréthane	Polyuréthane	Pompe à chaleur géothermie Eau/Air	Toiture entière
Ouate de cellulose	Ouate de cellulose	Pompe à chaleur géothermie Eau/Eau	

3.4.2 Indicateurs

Après avoir fait le choix de ce nous voulions faire varier dans notre étude, nous cherchons maintenant à savoir quels vont être les éléments, les indicateurs

permettant d'observer les résultats. Pour cela nous avons choisis trois indicateurs importants dans la RE 2020, des indicateurs qui permettront de nous situer par rapport à cette réglementation. Ces trois indicateurs sont le coût de construction du bâtiment qui nous permettra de se rapprocher du coût de la rénovation, l'émission de CO₂ opérative et la consommation d'énergie nette du bâtiment. Ces trois indicateurs sont décrits dans le Tableau 3-2 et seront utilisés pour la suite de l'étude. On comparera le coût avec l'émission de CO₂ puis avec la consommation d'énergie.

Tableau 3-2 : Indicateurs de l'étude

Indicateurs	Unité
Coût de construction total du bâtiment (existant + rénovation)	€
Émission opérative de CO ₂ du bâtiment	eq kg/an
Consommation d'énergie nette du bâtiment	kWh/an

Concernant le coût de construction total du bâtiment, qui sera un des indicateur tout au long de notre étude, il est composé du prix du bâtiment existant et du prix de la rénovation. Nous nous intéresserons seulement à la partie prix de rénovation car le prix du bâtiment existant n'a pas été réévalué pour cette étude. Ainsi il n'est pas intéressant d'utiliser ce nombre seul mais en le comparant avec les autres résultats que l'on obtiendra.

Le CO₂ équivalent (eq CO₂) émis est une mesure utilisée pour évaluer l'impact climatique des émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces gaz à effet de serre sont composés de différents éléments énumérés dans le Tableau 3-3, qui forme un cocktail de gaz. En convertissant les émissions de ces gaz en équivalent CO₂, il est plus facile de comparer et de quantifier l'impact total sur le climat d'un ensemble d'émissions provenant de différentes sources. Ainsi, le CO₂ équivalent permet d'évaluer de manière plus globale la contribution d'une activité humaine à l'augmentation de l'effet de serre et au changement climatique.

Tableau 3-3 : Composés des gaz à effet de serre

Gaz à effet de serre
CO ₂ (dioxyde de carbone)
CH ₄ (méthane)
N ₂ O (protoxyde d'azote)
Gaz fluorés

Nous avons maintenant bien défini les différentes variables que nous allons parcourir dans cette étude mais aussi les indicateurs, nous permettant d'observer les résultats de comparaison des variables précédemment énoncées. C'est une base pour la suite de notre étude.

3.5 Récolte et traitement des données

Pour ce qui est des données qui ont été utiles à l'étude, nous avons fait le choix de premièrement se pencher sur la recherche sur internet, que ça soit pour le choix de chaque élément, que ça soit pour leur caractéristiques techniques mais aussi de leur prix. Nous avons pris plusieurs sites internet permettant d'avoir un panel de choix assez grand et surtout pour avoir des résultats plus fiables. Puis en parallèle de cette recherche de récolte nous avons pu interroger certains corps de métier qui est en relation direct avec notre étude. Mais ce qui a vraiment été intéressant, était de pouvoir valider, après notre recherche, nos données précédemment trouvées sur internet. Une validation de la sorte, nous a permis d'être confiant sur la justesse de notre étude.

Il suffisait maintenant après avoir récolté les données nécessaires à l'étude de les incorporées dans le modèle sur le logiciel Design Builder.

3.6 Hypothèses générales

Pour la suite de notre étude sur la rénovation d'un bâtiment, il sera nécessaire de fixer certaines hypothèses dans le but de définir les paramètres de notre analyse et bien sûr de vérifier la cohérence de nos résultats finaux. Ces hypothèses serviront de base solide pour nos simulations et nous permettront d'évaluer les différentes combinaisons de solutions de rénovation dans un contexte réaliste.

Les systèmes de chauffage qui seront présents dans notre optimisation ont tous pour caractéristique une haute efficacité énergétique. Cela signifie qu'ils sont conçus pour maximiser la production de chaleur tout en minimisant la consommation d'énergie et donc l'émission de CO₂. Ces systèmes utilisent des technologies avancées et rependus dans le monde actuel (Lacas, 2021), (Statista Research Department, 2023), telles que les chaudières à condensation, les pompes à chaleur, etc. Leur performance énergétique est constante et cohérente dans toutes les simulations étudiées. Les calculs de consommation d'énergie sont basés sur des modèles thermiques précis prenant en compte les caractéristiques spécifiques du bâtiment, telles que l'isolation et les pertes thermiques.

Les panneaux photovoltaïques utilisés dans l'optimisation sont fiables et offrent une performance constante toute au long des simulation. Ils sont conçus pour convertir l'énergie solaire en électricité avec une efficacité prédéfinie en fonction de leur surface. Les données utilisées pour évaluer la performance des panneaux photovoltaïques sont basées sur des mesures réelles et des modèles solaires précis prenant en compte les variations saisonnières du rayonnement solaire fixé sur le logiciel Design Builder et reprenant l'année 2022. Les panneaux photovoltaïques

sont considérés comme ayant un fonctionnement qui ne fluctuera pas et sera stable tout le long de l'étude.

Les différents isolant sont définis en fonction de leurs performances thermiques, de leur capacité à réduire les pertes de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment, de leur masse volumique et de leur capacité thermique, nous viendrons plus précisément les définir dans le Chapitre 5. La conductivité thermique des isolants est considérée comme constante, ce qui permet de calculer précisément les gains ou pertes de chaleur à travers les parois du bâtiment. Les variations d'épaisseur de l'isolant sont appliquées de manière cohérente sur toute la surface de l'enveloppe, c'est-à-dire qu'aucun pont thermique n'est considéré ici, et les calculs prennent en compte les effets de la conductivité thermique sur les performances énergétiques du bâtiment.

Le bâtiment est considéré comme deux surfaces homogènes, une surface pour les murs extérieurs et une surface pour la toiture, c'est-à-dire que toutes les parties de la toiture et des murs extérieurs sont traitées respectivement de la même manière en termes d'isolant et d'épaisseur. Les variations de type d'isolant et d'épaisseur sont appliquées de manière cohérente sur toute la surface de la toiture et des murs extérieurs, en tenant compte de la continuité thermique et de l'intégrité structurelle du bâtiment. Cela permet d'obtenir des résultats représentatifs de l'ensemble du bâtiment. Les ponts thermiques spécifiques, tels que les balcons ou les dalles connectées à l'enveloppe extérieure, ne sont pas pris en compte dans cette étude, mais leur impact pourrait être estimé de manière globale en utilisant des modèles de simulation appropriés dans de prochaines études et simulations.

Les conditions d'utilisation du bâtiment, telles que la température intérieure de consigne, le taux d'occupation et les habitudes de chauffage, sont considérées comme fixées par rapport à la programmation définie tout au long de l'étude d'optimisation, un planning est décrit Chapitre 4. Les scénarios étudiés tiennent compte des variations saisonnières de la demande de chauffage et prennent en compte les besoins spécifiques des occupants, c'est ce que l'on peut observer Chapitre 4 sur le détail de la consommation en chauffage du bâtiment.

Tous les matériaux d'isolation, les systèmes de chauffage et les panneaux photovoltaïques considérés dans l'étude sont disponibles sur le marché et conformes aux normes et réglementations en vigueur. Cela garantit que les solutions proposées sont techniquement réalisables et qu'elles peuvent être mises en œuvre dans la pratique. Les coûts des différents matériaux d'isolation, des systèmes de chauffage et des panneaux photovoltaïques sont considérés comme invariables et prévisibles tout au long de l'étude, ils seront fixés pour notre étude. Cela permet d'évaluer de manière précise les coûts des différentes configurations étudiées et de comparer les avantages économiques des différentes options de rénovation.

Les équipements de chauffage, tels que les chaudières ou les pompes à chaleur, ainsi que les panneaux photovoltaïques, sont considérés comme ayant une durée de vie infinie. Cette durée de vie est constante pour tous les scénarios étudiés, c'est-à-dire que nous ne prendrons pas en compte l'usure des pièces et donc la diminution de l'efficacité des systèmes. De plus, cette étude ne permet pas d'évaluer les coûts de remplacement des équipements sur la durée de vie du bâtiment, sur qui pourra être le sujet d'une étude complémentaire à celle-ci.

Le comportement des occupants en termes de réglage de la température intérieure, d'utilisation des équipements et de gestion de l'énergie est considéré comme constant et uniforme dans toutes les configurations étudiées. Les scénarios tiennent compte des habitudes typiques des occupants en matière de chauffage et de refroidissement, ainsi que de l'utilisation des équipements électriques que l'on définit Chapitre 4 mais aussi à l'Annexe 1. Les variations saisonnières de comportement sont prises en compte pour refléter les changements de confort et de demande d'énergie tout au long de l'année.

Les données météorologiques utilisées pour les simulations, telles que la température extérieure, le rayonnement solaire, etc., sont considérées comme représentatives des conditions climatiques du lieu où se situe le bâtiment et de l'année 2022. Ces données sont basées sur des enregistrements historiques ou des modèles météorologiques fiables et précis.

Le bâtiment est considéré comme étant en bon état structurel, sans défauts de construction significatifs pouvant affecter ses performances thermiques, et surtout permettant de rajouter un poids supplémentaire à la structure déjà existante. Les caractéristiques du bâtiment, telles que l'étanchéité à l'air et la qualité de l'enveloppe, sont conformes aux normes en vigueur pour assurer une évaluation précise des performances énergétiques. Les pertes thermiques à travers l'enveloppe sont calculées en tenant compte de l'intégrité structurelle du bâtiment.

La ventilation et le refroidissement n'ont pas été pris en compte dans cette étude, car l'objectif principal est d'optimiser l'enveloppe thermique et les systèmes de chauffage pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. Cependant, un taux d'infiltration fixe a été considéré et maintenu constant tout au long des optimisations pour prendre en compte les pertes d'air indésirables à travers l'enveloppe.

Les différents paramètres étudiés, tels que le type et l'épaisseur de l'isolant, le système de chauffage et la surface des panneaux photovoltaïques, sont considérés comme indépendants les uns des autres. Cela signifie que les variations de l'un de ces paramètres n'affectent pas directement les autres. Cette approche permet d'évaluer l'impact spécifique de chaque paramètre sur les performances énergétiques et environnementales du bâtiment, tout en permettant de les comparer entre eux.

Les performances énergétiques du bâtiment, telles que la consommation d'énergie nette et les émissions de CO₂ opératives, sont supposées varier de manière linéaire en fonction des paramètres étudiés. Cela signifie que les changements apportés aux paramètres de rénovation, tels que l'isolant, le système de chauffage ou la surface des panneaux photovoltaïques, entraînent des variations proportionnelles des performances énergétiques. On obtient donc, grâce à cette hypothèse, une relation de cause à effet entre les paramètres de rénovation et les performances énergétiques du bâtiment.

En prenant en compte ces hypothèses, vous pourrez mener des simulations d'optimisation pour évaluer les différentes combinaisons de solutions de rénovation et identifier celles qui minimisent le coût du bâtiment tout en réduisant la consommation d'énergie nette et les émissions de CO₂ opératives. Cela nous permettra d'obtenir un panel de combinaisons de solutions optimales.

3.7 Limites de l'étude

L'étude que nous avons réalisée pour optimiser la rénovation énergétique de notre bâtiment présente certaines conditions limites qui doivent être prises en compte et nous en ferons la liste par la suite. Les résultats, les données mais aussi la méthodologie pourrait être altérer par ces limitations. Ainsi ces limitations peuvent affecter l'interprétation générale de l'étude. Il est essentiel de les identifier et de les décrire avec précision afin de garantir une compréhension claire des paramètres dans lesquels nos résultats peuvent être appliqués.

3.7.1 Les données

Nous utilisons des données disponibles sur le marché et des données mesurées, mais il est important de noter que leur disponibilité peut varier en fonction des sources et des régions géographiques. Bien que nous nous efforcions de collecter des données fiables et représentatives, il est possible que certaines informations spécifiques à notre bâtiment ou à notre contexte ne soient pas disponibles. Cela a été le cas pour les matériaux et les systèmes de chauffage, qui ont plutôt été sélectionné dans un contexte français. Ces choix peuvent limiter la précision et la réalité de nos résultats.

De plus, les données récupérées du bâtiment, que nous décrivons Chapitre 4, venaient d'une précédente étude qui avait pour objectif de réaliser une typologie de bâtiment bien précis (Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet, & Gulirmak, 2021). Ces données étaient la modélisation 3D du bâtiment, l'utilisation du bâtiment, son orientation. Nous devons donc faire confiance à cette précédente étude pour la réalisation du bâtiment sur le logiciel Design Builder et sur le fait que cette typologie représente un grand nombre de bâtiment, pas seulement quelques un.

3.7.2 Géographie

Nous avons décidé de réaliser cette étude sur le sol Français, tout en prenant une typologie qui a été réalisée en Belgique. C'est un point important à bien prendre en compte dans la cohérence de nos résultats avec la réalité des choses. Ce choix a été expliqué Chapitre 4 de notre étude.

3.7.3 Méthodologie

Notre étude repose sur des simulations et des modélisations pour évaluer les performances énergétiques et environnementales du bâtiment rénové. Bien que ces approches offrent des avantages en termes d'efficacité et de flexibilité, elles sont basées sur des hypothèses et des simplifications, que l'on énumère Chapitre 3, et qui peuvent introduire une certaine marge d'erreur. Il est important de reconnaître que nos résultats sont basés sur des modèles et des estimations, et qu'ils peuvent ne pas refléter parfaitement les conditions réelles du bâtiment. Cela introduit bien une limitation à notre recherche et devra être mentionnée par la suite.

3.7.4 Objectivité

Une autre limitation potentielle réside dans notre implication directe dans le projet de rénovation du bâtiment. Cette relation peut affecter notre objectivité lors de l'évaluation des résultats. Il est essentiel de reconnaître cet élément et de prendre des mesures pour atténuer son impact. Nous nous engageons à adopter une approche critique et transparente dans notre analyse, en prenant en compte les différentes perspectives et en évaluant de manière objective les performances des différentes stratégies de rénovation.

Malgré ces limitations, nous avons pris des mesures pour minimiser leur impact et garantir la validité de notre étude. Nous avons utilisé des données fiables et disponibles, nous avons utilisés des modèles de simulation avancés et nous avons adopté une approche méthodologique rigoureuse, que nous avons même dédoublé pour diminuer le risque d'erreur. De plus, nous avons identifié et décrit ces limitations dès le début de notre étude, ce qui nous permettra de prendre en compte leur influence dans nos conclusions finales et dans les limitations de notre étude, Chapitre 7 et 8.

En conclusion, bien que notre étude présente certaines limitations, nous sommes conscients de ces défis et nous avons pris des mesures pour passer outre. En intégrant bien les conditions limites tout au long de notre recherche, nous pouvons interpréter nos résultats de manière appropriée et formuler des recommandations éclairées pour l'optimisation de la rénovation énergétique des bâtiments.

3.8 Critère de qualité

Pour notre étude, il a été nécessaire de s'interroger sur les différentes réglementations en vigueur, telle que la RE 2020. De plus, le bâtiment que nous avons récupéré a été réalisé dans un cadre sérieux et structuré permettant d'avoir une qualité sur l'élément de base de notre étude, qui est ce bâtiment.

Pour ce qui est de nos données, que nous avons récupérées, il a été intéressant de se renseigner de différentes façons. La première sur divers sites, que cela soit sur des forums ou que ça soit sur des sites de grande entreprise de l'énergie française. Et la seconde manière est d'avoir contacté certains professionnels du milieu.

Ces professionnels nous ont surtout permis de vérifier nos données et donc de répéter la vérification plusieurs fois car nous avons pu communiquer avec deux professionnels différents, un architecte DPLG et un ingénieur thermicien.

4 Cas d'étude

4.1 Sélection d'une typologie

Pour réaliser notre étude et nos optimisations, il sera utile de sélectionner une typologie de bâtiment. Pour se faire, il est nécessaire d'identifier les différents critères permettant cette sélection.

En voici un certain nombre :

- Un logement unifamilial français
- Un logement avec des performances énergétiques très réduites, qui est donc très faiblement isolé ou pas du tout
- Un logement ayant aucun caractère patrimonial, permettant la modification de la façade mais aussi l'ajout, en toiture, de panneaux photovoltaïques

Nous avons fait le choix d'utiliser une des typologies du projet de recherche intitulé "Developing two benchmark models for post-world war residential buildings", menée par Attia S., Mustafa A., Giry N. et Popineau M. entre 2018 et 2020. Dans notre étude la typologie sélectionnée est la A. Ce bâtiment que nous avons situé à Nantes représente une partie du parc de logement du Nord-Ouest de l'Europe. Nous avons aussi fait ce choix de bâtiment, car c'est un bâtiment qui a été développé avec précision, mais aussi qui permet d'avoir un accès facile à la donnée, car très complet. Dans notre cas, le seul élément qui change est le contexte. Ici on ne prendra que très peu en compte le contexte à part pour ce qui est de la météorologie du site. Ce contexte a été modifié, car c'est un contexte important pour nous. Il se situe près de la zone de notre futur travail. C'est donc pour cela, que nous avons choisi de placer ce bâtiment dans la ville de Nantes en France, car il est représentatif d'une partie des bâtiments du Nord-Est de l'Europe.

Notre étude se concentre sur la rénovation énergétique d'un bâtiment situé à Nantes, construit à la suite de la Seconde Guerre mondiale. Ce bâtiment a une importance historique et contextuelle particulière, étant le témoin d'une époque de reconstruction et de développement urbain après les ravages de la guerre. Dans cette présentation, nous passerons en revue le contexte et l'histoire de ce bâtiment, soulignant son importance dans le paysage architectural et sa pertinence pour notre étude d'optimisation énergétique.

Après la Seconde Guerre mondiale, la France, comme de nombreux autres pays, a dû faire face à des défis considérables en terme de reconstruction et de réhabilitation urbaine. La ville de Nantes, située dans l'ouest de la France, n'a pas échappé à ces bouleversements. Dans ce contexte, de nombreux bâtiments ont été construits pour répondre aux besoins de logement et de revitalisation des quartiers. Une grande partie du pays a dû être reconstruit.

Le bâtiment en question a été construit dans cette période d'après-guerre, incarnant les principes architecturaux et les techniques de construction de l'époque. Il a été conçu pour répondre aux besoins de logement et aux contraintes économiques de l'époque.

Notre bâtiment est un exemple représentatif de l'architecture de l'après-guerre. Il se compose d'une structure en béton armé, typique de cette époque, offrant une résistance et une durabilité accrues. Le bâtiment présente une disposition générale compacte, avec des murs extérieurs et une toiture traditionnelles. Son emplacement dans la ville de Nantes ajoute une dimension contextuelle intéressante. Nantes est une ville riche en histoire et en patrimoine architectural.

La rénovation énergétique de ce bâtiment de l'après-guerre a une importance particulière dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement durable. En appliquant les principes de la réglementation environnementale et en optimisant les performances énergétiques, nous pouvons contribuer à la préservation du patrimoine architectural tout en répondant aux exigences contemporaines en matière de durabilité et d'efficacité énergétique.

Le bâtiment de l'après Seconde Guerre mondiale à Nantes est un témoin de l'histoire de la reconstruction et de l'évolution urbaine. Notre étude vise à optimiser sa rénovation énergétique, en harmonisant les conditions de préservation du patrimoine avec les enjeux actuels de durabilité. En comprenant le contexte et l'importance de ce bâtiment, nous sommes mieux préparés à aborder les défis et à formuler des recommandations adaptées pour une rénovation énergétique réussie.

4.2 Présentation du cas d'étude

4.2.1 Origine du cas d'étude

Le cas d'étude de cette recherche est basé sur le projet de recherche intitulé "Developing two benchmark models for post-world war residential buildings", mené par Attia S., Mustafa A., Giry N. et Popineau M. entre 2018 et 2020. Dans cette étude, les auteurs ont entrepris d'évaluer les performances énergétiques réelles des bâtiments résidentiels construits en Belgique pendant la période d'après-guerre. Pour ce faire, ils ont réalisé un inventaire à partir du cadastre et une enquête sur le terrain portant sur plus de 1000 maisons individuelles à quatre façades datant de cette période. Cette enquête a permis de caractériser les performances de chaque bâtiments ainsi que le comportement des occupants. À la suite de cette analyse, deux maisons représentatives ont été identifiées comme archétypes :

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

Dans un premier temps, l'analyse de la consommation d'énergie a été réalisée de manière empirique en effectuant un audit énergétique complet pour chaque archétype et en compilant les factures d'énergie de 2014 à 2019. Les données recueillies ont ensuite été utilisées pour effectuer des simulations de performances à l'aide du logiciel EnergyPlus.

4.2.2 Détails de la typologie A

La typologie que nous avons choisi d'intégrer dans notre étude est une maison quatre façades pour une famille, elle se situe dans la ville de Nantes, en France. La Figure 4-1 représente une photo de cette typologie.



Figure 4-1 : Photo représentant la typologie A de la maison unifamilial

Il a donc été réalisé son double numérique sur le logiciel Design Builder et nous a permis d'obtenir une base sûre pour la suite de notre étude. Nous avons donc récupéré cette modélisation et pouvons maintenant voir une représentation schématique de ce bâtiment à la Figure 4-2.

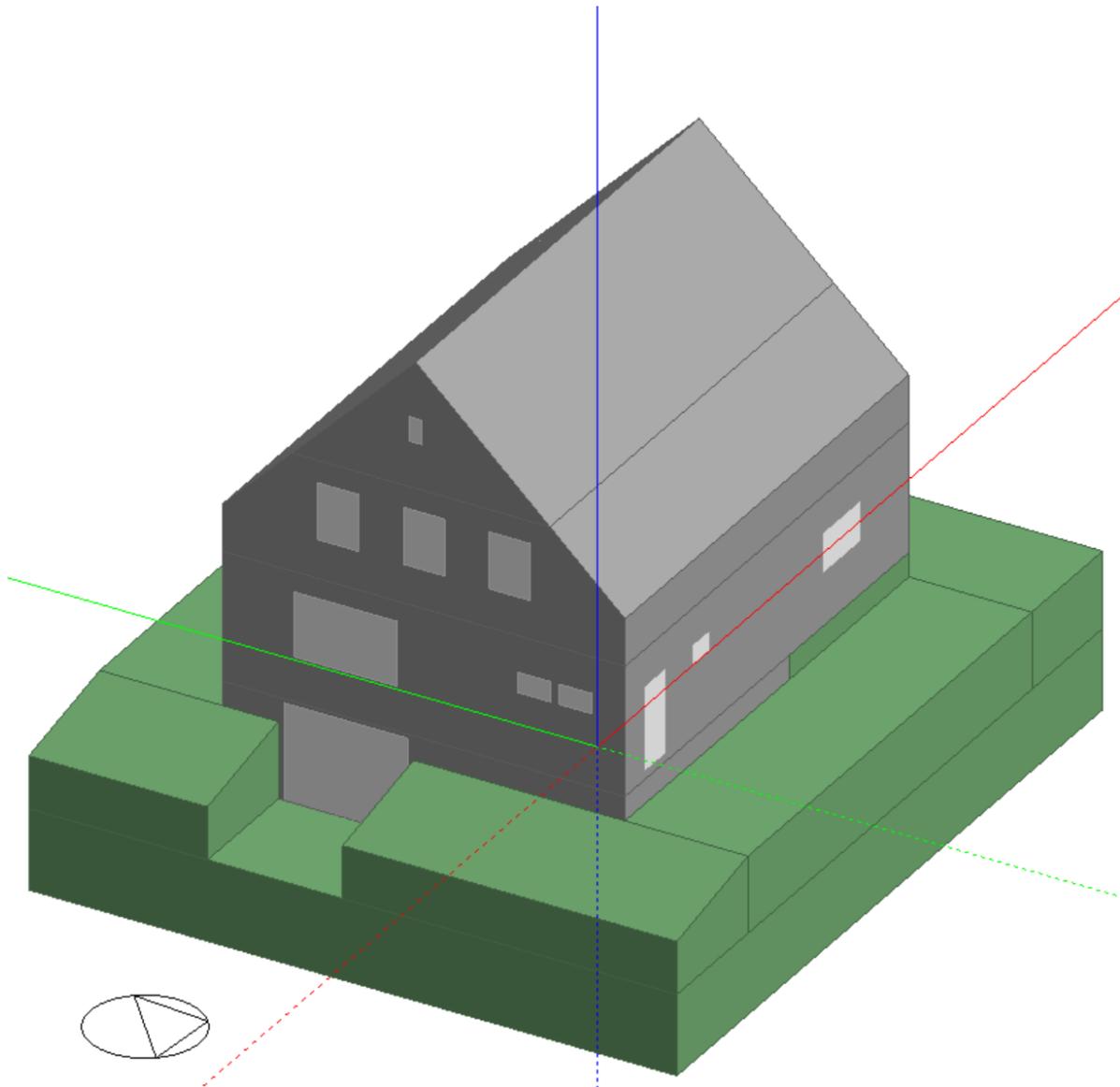


Figure 4-2 : Schéma de la typologie du bâtiment

Cette habitation a une forme rectangulaire avec une toiture à double pentes avec une inclinaison à 45° . La surface de l'habitation est de 200 m^2 repartit sur trois niveaux différents. Un premier niveau qui se trouve en partie en sous-sol avec tout un espace garage et atelier. Un second niveau en rez-de-chaussée qui lui comporte les pièces de vie telles que le séjour, la cuisine avec cellier, un hall d'entrée avec des WC. Finalement, un dernier étage réservé à l'espace nuit où se trouve les différentes chambres et la salle de bain commune à toutes les chambres. Nous trouvons une gaine technique permettant de passer toute la technique du bâtiment du sous-sol au dernier niveau et même avoir une cheminée en son extrémité. Au niveau des dimensions, le sous-sol est plus petit que le reste des étages mais permet quand même d'accueillir une place de parking tout en ayant d'autres fonctions à côté. On retrouve donc la représentation en plan de tous ces étages sur la Figure 4-3 mais aussi ses élévations sur la Figure 4-4 et finalement le récapitulatif de toutes les pièces de la maison sur le Tableau 4-1

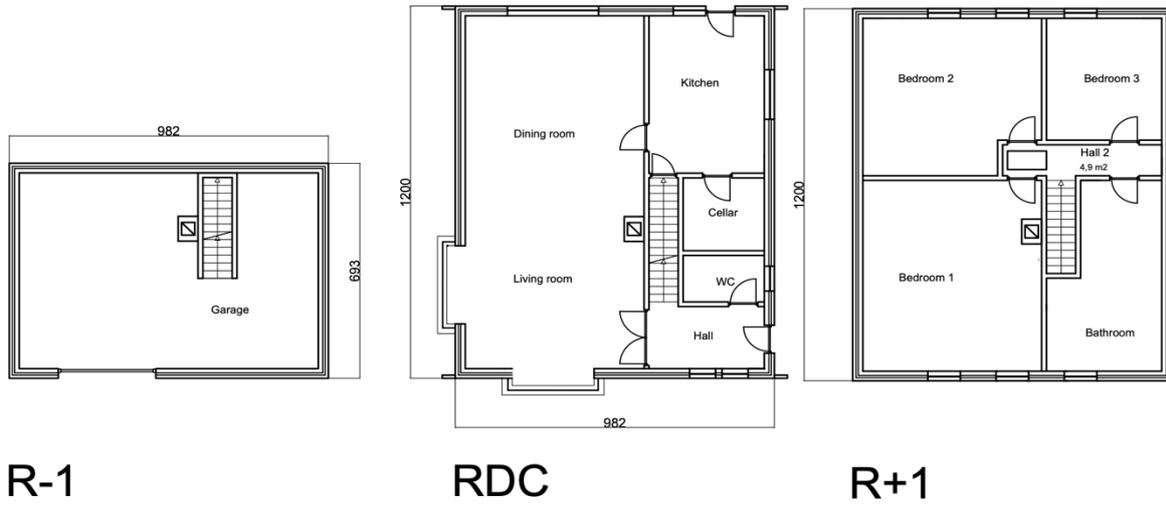


Figure 4-3 : Plans du bâtiment

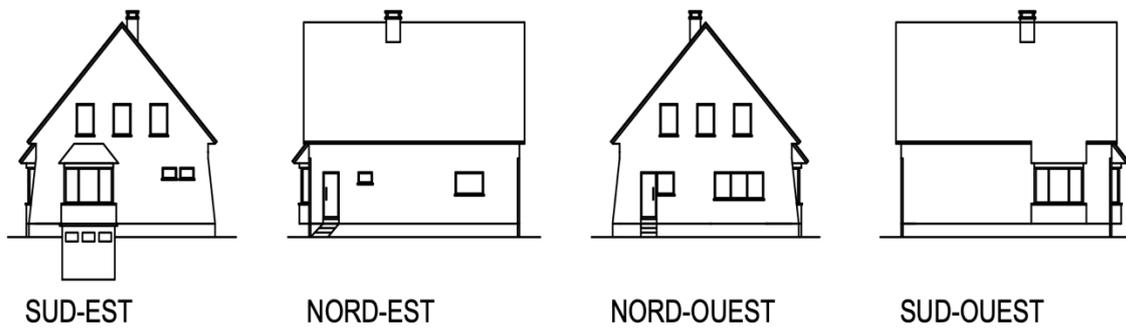


Figure 4-4 : Façades du bâtiment

Tableau 4-1 : Récapitulatif des pièces

Pièce	Surface (m ²)
Garage	53,6
Séjour	66,0
Cuisine	18,1
Cellier	5,9
WC	3,8
Hall	5,6
Hall 2	4,9
Chambre 1	35,5
Chambre 2	26,4
Chambre 3	14,0
Salle de bain	18,5

En ce qui concerne la composition et la performance des parois, celles-ci sont de composition très simple. On retrouve la composition des murs extérieurs sur le Tableau 4-2 et concernant la composition de la toiture inclinée du bâtiment on la retrouve sur le Tableau 4-3.

Tableau 4-2 : Composition des murs extérieurs

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)
Brique	0,01	0,10
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07
Béton	0,80	0,14

Tableau 4-3 : Composition de la toiture inclinée

Composition de la toiture inclinée	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)
Tuile	X	0,025
Lame d'air ventilée	X	0,02
Feutre bituminé	0,04	0,005

Concernant le système de chauffage, le bâtiment est actuellement chauffé grâce à une chaudière à gaz. Pour ce qui est de l'eau chaude sanitaire, elle est chauffée avec un ballon d'eau chaude. Et finalement, au niveau de la ventilation du bâtiment, aucune n'est prévue de base.

Pour notre étude, le bâtiment a été considéré comme habité par une famille. Dans l'intégralité du bâtiment, un système de planning d'utilisation des pièces a été mis en place pour simuler l'utilisation de l'électricité, de l'éclairage, de l'utilisation de machine dans le bâtiment. Le planning prend en compte les périodes de vacances et aussi les périodes de travail, que nous pouvons voir sur la Figure 4-5. Et voici un récapitulatif des pièces et de leur utilisation :

- Zone de vie : Séjour / Cuisine
- Zone de nuit : Chambre 1 / Chambre 2 / Chambre 3
- Zone de passage : Garage / Cuisine / Cellier / WC / Hall / Hall 2 / Salle de bain

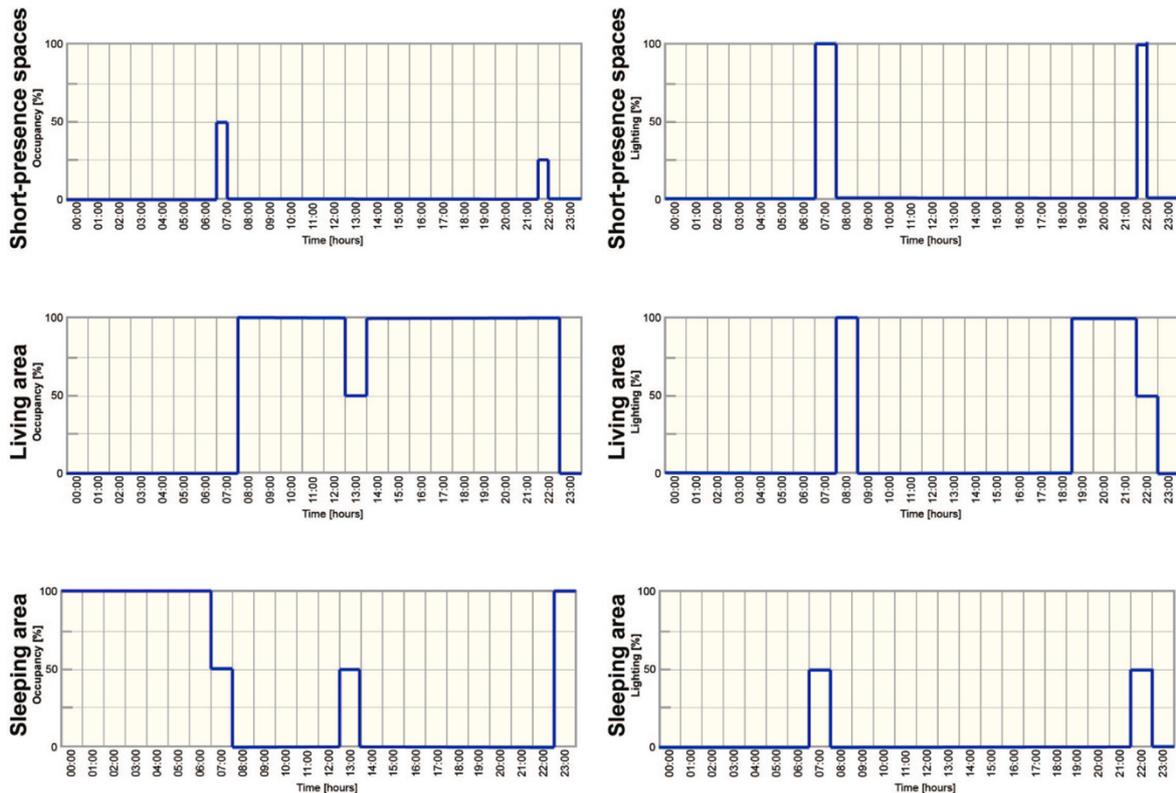


Figure 4-5 : Planning d'utilisation et de l'éclairage des pièces de la maison

Nous pouvons maintenant nous intéresser à la consommation du bâtiment en elle-même, après avoir parcouru son enveloppe et son fonctionnement. Chaque kWh est ramené à son utilisation, que ça soit pour le chauffage, l'éclairage, l'électricité utilisée dans les pièces et l'eau chaude sanitaire. Nous pouvons donc observer les différences de quantité entre ces catégories. Cette consommation a été ensuite ramenée à l'année permettant donc de calculer son coût de revient. Ce calcul a été réalisé en prenant en compte quelle énergie a été utilisé. Avec chaque quantité d'énergie utilisé, il a été possible de rapporter ça au coût par le biais du coût du kWh, qui est de 0,1284€/kWh de gaz (d'après Tarif B0 de Base ENGIE France en 2023) et de 0,2062€/kWh d'électricité (d'après Tarif Bleu de Base EDF France en 2023). Ce coût et la consommation d'une année du bâtiment peuvent s'observer sur la Figure 4-6, nous pouvons ramener cette consommation et ce coût au mètre carré et nous obtenons les résultats de la Figure 4-7.

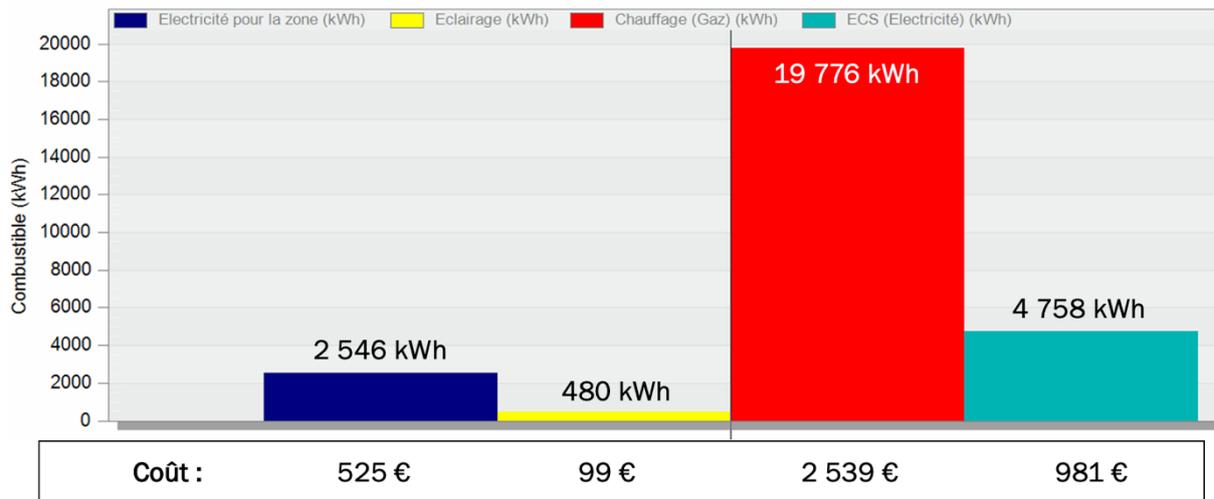


Figure 4-6 : Détail de la consommation du bâtiment

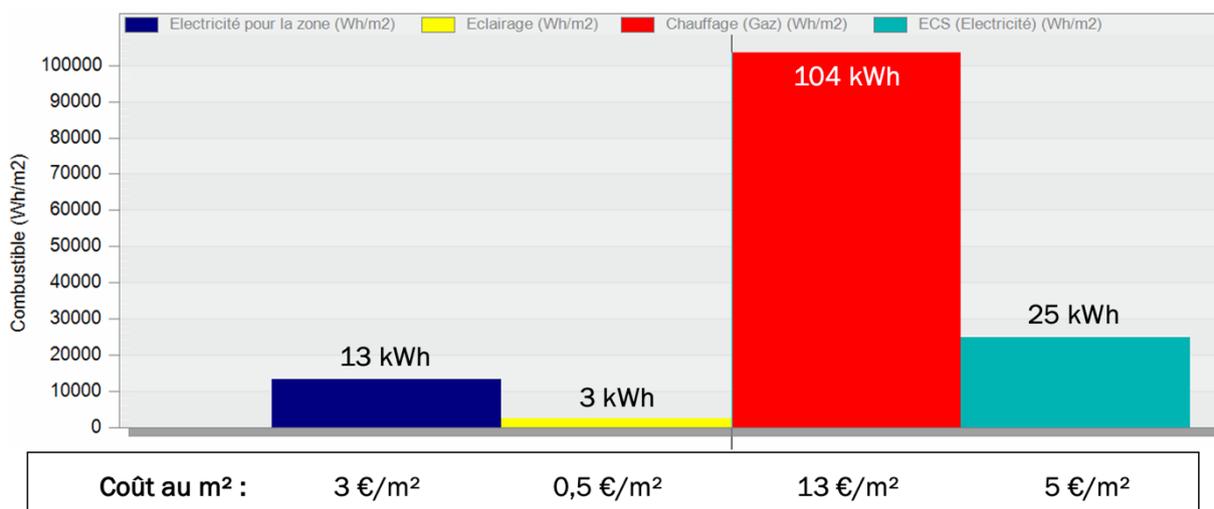


Figure 4-7 : Détail de la consommation du bâtiment au m²

Cette consommation que nous avons observé sur les deux précédentes Figures, peut être observée sur chaque mois de l'année. Cela nous permet de voir le rapport entre la période d'hiver et d'été sur le chauffage (sur la Figure 4-8) mais aussi les habitudes des utilisateurs sur l'utilisation des douches et autres. De même l'utilisation de l'éclairage diminue en période estivale en vue des plus longues journées.

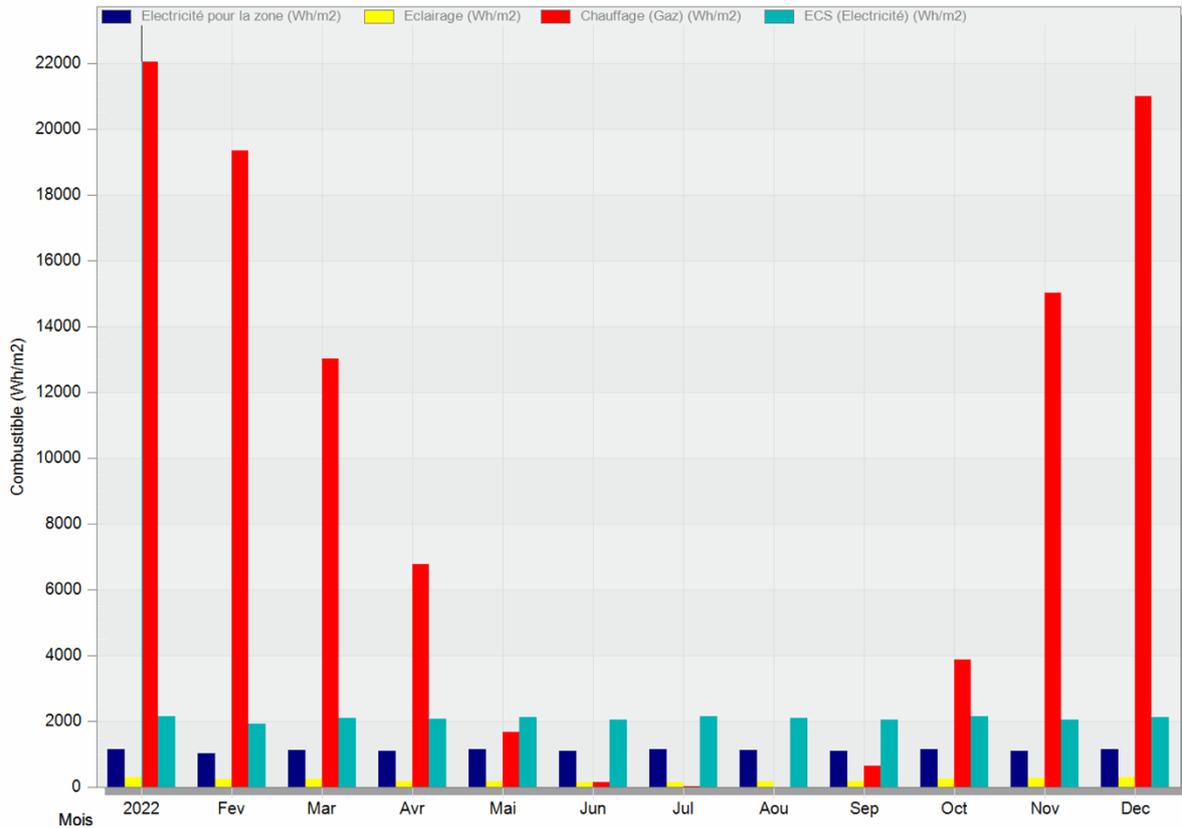


Figure 4-8 : Consommation du bâtiment au m² en fonction du mois de l'année

Nous pouvons maintenant nous intéresser à l'émission de CO₂ du bâtiment, qui devient maintenant un critère très important dans les réglementations environnementales. C'est pour cela que nous désirons nous pencher sur cette variable qui est l'émission de CO₂, que nous pouvons observer sur la Figure 4-9 et qui représente l'émission sur un an, mois par mois. On observe directement la liaison entre l'énergie précédemment vu à la Figure 4-8 et celle-ci, c'est-à-dire que lors des périodes hivernales, l'émission de CO₂ est beaucoup plus importante que pendant les périodes estivales.

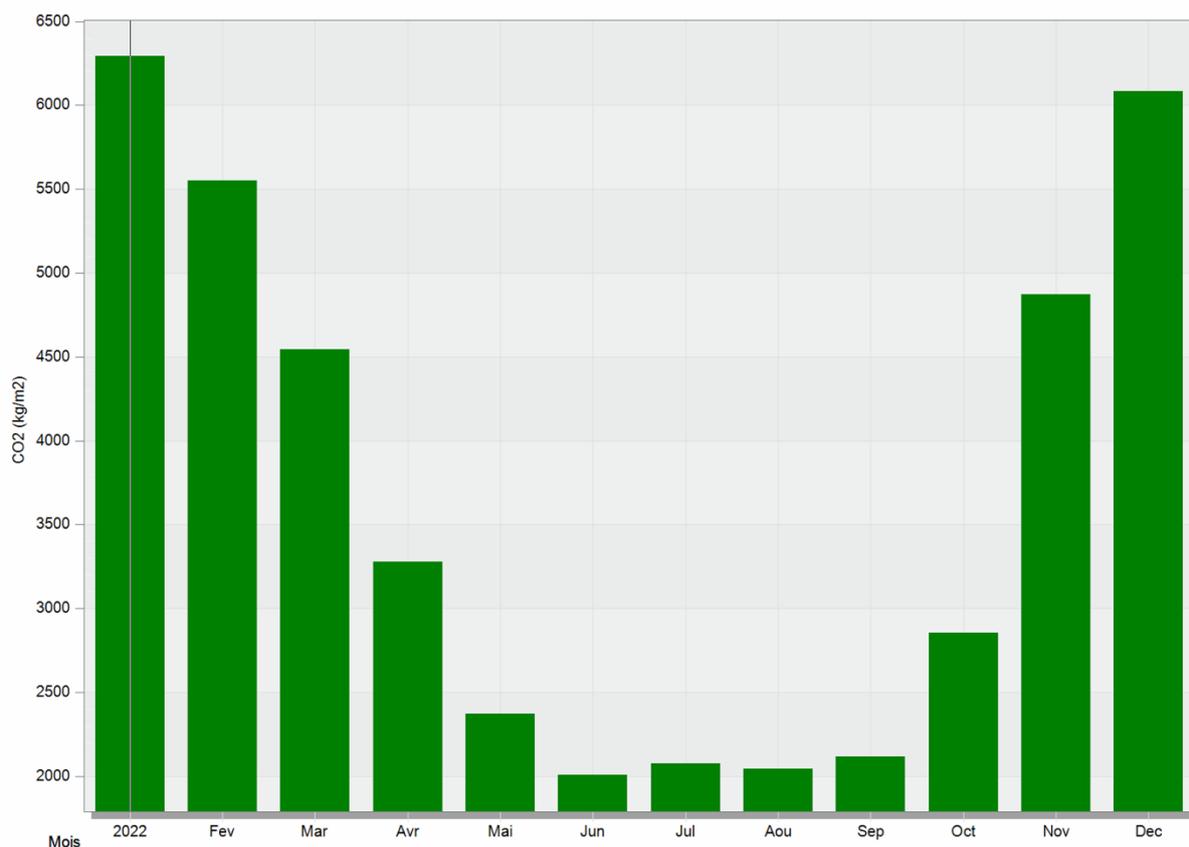


Figure 4-9 : Émission de CO₂ en fonction du mois de l'année

Pour conclure sur les consommations du bâtiment, nous cherchons à déterminer les potentiels points de faiblesse de ce bâtiment. Pour cela il sera intéressant de se pencher sur les pertes thermiques du bâtiment, que nous avons représenté sur la Figure 4-10. Nous pouvons voir que l'apport en chaleur (représenté en rouge ici) vient du système de chauffage, et que tout ce qui est dans le négatif ici sont les pertes ou utilisation de la chaleur produite ou captée. Ici deux éléments ressortent de façon significative, les pertes thermiques au niveau des murs extérieurs (représentés en violet) et les pertes thermiques au niveau de la toiture (représentés en marron). Ce sont donc deux critères qui seront à travailler dans la suite de notre étude, car sachant que les pertes les plus importantes se trouvent à ces endroits, c'est donc sur ces points que l'on pourra réduire de manière plus efficace les pertes.

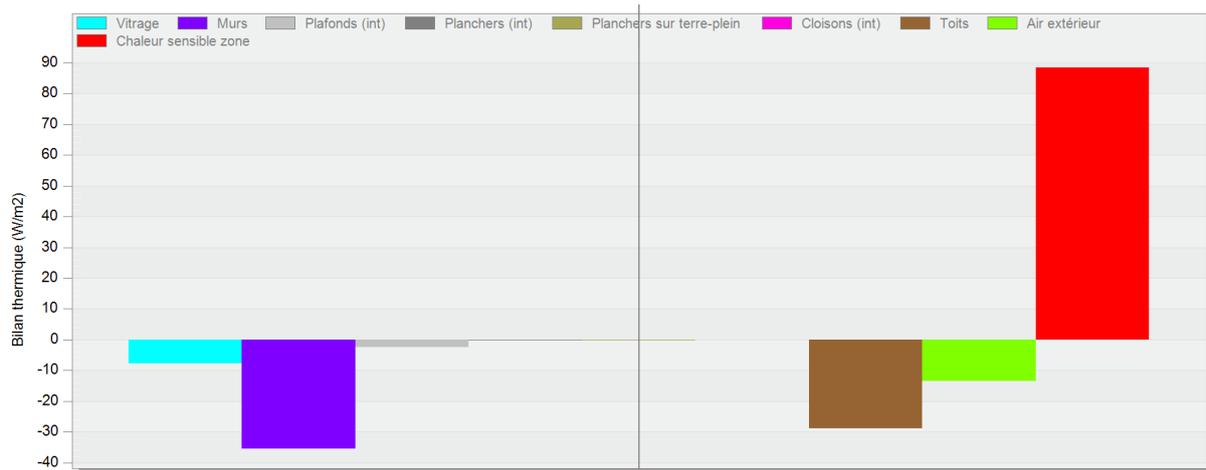


Figure 4-10 : Pertes thermiques du bâtiment étudié

4.2.3 Adaptation de la typologie A aux besoins de l'étude

Concernant les modifications qui ont été réalisées sur le modèle de notre bâtiment, seulement quelques-unes ont dû être faites pour faciliter notre étude.

La première est la modification des systèmes de ventilation et il a été supprimé du bâtiment pour qu'il ne soit pas pris en compte. Ce choix a été réalisé pour limiter le nombre de paramètres que nous allons faire varier dans notre étude. Cependant nous avons pu fixer pour éviter d'avoir aucune ventilation dans le bâtiment, un taux d'infiltration 0,6 vol/h.

De plus, pour la suite de l'étude, nous avons dû préalablement rajouter les 4 surfaces de panneaux photovoltaïques pour mettre de faire les calculs d'ajout ou non de ces panneaux.

Pour ce qui est du reste, il n'était pas nécessaire de modifier le modèle, car il avait été réalisé avec suffisamment de détail dans la précédente étude. On peut donc considérer deux seuils pour ce bâtiment : le premier qui est un seuil de CO₂, qui est de 4 kg eq/an/m², soit 800 kg eq/an pour notre bâtiment. Et un second seuil de 100 kWh/an/m², soit 20 000 kWh/an pour notre bâtiment. Ces seuils seront utilisés dans la suite de notre étude.

5 Scénarios de rénovations

Nous avons préalablement énuméré les différentes variables que nous allons parcourir dans notre étude. Ce chapitre nous permettra de détailler ces variables et de définir comment nous allons les faire varier. Nous parcourrons donc les quatre catégories de variables.

5.1 Scénarios de rénovation des murs extérieurs

5.1.1 Considérations générales

Concernant l'isolation des murs extérieurs, le choix d'isoler par l'intérieur a été le plus facile et le plus cohérent, car il serait pertinent de toucher au minimum à l'esthétique extérieur du bâtiment. Nous nous sommes placés ici dans un cas où aucun problème de patrimoine n'est mis en avant. Pour un bâtiment ayant une reconnaissance patrimoniale, il sera nécessaire de suivre les réglementations en vigueur. C'est pour cela que nous venons, de façon théorique, rajouter une couche supplémentaire à l'intérieur au complexe déjà existant.

De plus, on utilisera des épaisseurs d'isolant standards, qui sont utilisées dans les chantiers en France. Pour les murs extérieurs, on retrouvera des épaisseurs allant de 80 mm, 120 mm, 160 mm à 200 mm.

Nous pouvons maintenant parcourir les différents isolants que nous avons défini avec le Tableau 3-1.

5.1.2 Laine de verre

Dans le cas de l'ajout de laine de verre, représenté sur la Figure 5-1, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-1.



Figure 5-1 : Représentation de la laine de verre

Tableau 5-1 : Composition des murs extérieurs avec de la laine de verre

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Laine de verre	0,35	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	80	80

5.1.3 Laine de bois

Dans le cas de l'ajout de laine de bois, représenté sur la Figure 5-2, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-2.



Figure 5-2 : Représentation de la laine de bois

Tableau 5-2 : Composition des murs extérieurs avec laine de bois

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Laine de bois	0,45	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	250	110

5.1.4 Laine de roche

Dans le cas de l'ajout de laine de roche, représenté sur la Figure 5-3, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-3.



Figure 5-3 : Représentation de la laine de roche

Tableau 5-3 : Composition des murs extérieurs avec de la laine de roche

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Laine de roche	0,40	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	40	30

5.1.5 Polystyrène extrudé

Dans le cas de l'ajout du polystyrène extrudé représenté sur la Figure 5-4, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-4.



Figure 5-4 : Représentation du polystyrène extrudé

Tableau 5-4 : Composition des murs extérieurs avec du polystyrène extrudé

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Polystyrène extrudé	0,35	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	40	52

5.1.6 Polyuréthane

Dans le cas de l'ajout du polyuréthane, représenté sur la Figure 5-5, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-5.



Figure 5-5 : Représentation du polyuréthane

Tableau 5-5 : Composition des murs extérieurs avec du polyuréthane

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Polyuréthane	0,25	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	32	56

5.1.7 Ouate de cellulose

Dans le cas de l'ajout de ouate de cellulose, représenté sur la Figure 5-2, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-2.



Figure 5-6 : Représentation de la ouate de cellulose

Tableau 5-6 : Composition des murs extérieurs avec de la ouate de cellulose

Composition des murs extérieurs	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Brique	0,84	0,10	1500	1060
Lame d'air non ventilée	0,02	0,07	1,3	1250
Béton	1,5	0,14	2500	2500
Ouate de cellulose	0,38	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	30	57

5.2 Scénarios de rénovation de la toiture

5.2.1 Considérations générales

Concernant l'isolation de la toiture, nous avons fait le choix d'isoler par l'intérieur pour les mêmes raisons que pour les murs extérieurs. C'est pour cela que nous venons, de façon théorique, rajouter une couche supplémentaire à l'intérieur du complexe déjà existant.

Les épaisseurs seront vues à la hausse au niveau de la toiture, car d'après la RE 2020, il est nécessaire d'avoir une résistance thermique plus importante en toiture

que sur les murs extérieurs. Ainsi pour la toiture, on retrouvera des épaisseurs allant de 120 mm, 160 mm, 200 mm à 240 mm.

Nous pouvons maintenant parcourir les différents isolants que nous avons défini avec le Tableau 3-2.

5.2.2 Laine de verre

Dans le cas de l'ajout de laine de verre, représenté sur la Figure 5-7, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-7.



Figure 5-7 : Représentation de la laine de verre

Tableau 5-7 : Composition de la toiture avec de la laine de verre

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Laine de verre	0,35	0,08 / 0,12 / 0,16 / 0,20	80	80

5.2.3 Laine de bois

Dans le cas de l'ajout de laine de bois, représenté sur la Figure 5-8, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-8.



Figure 5-8 : Représentation de la laine de bois

Tableau 5-8 : Composition de la toiture avec laine de bois

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Laine de bois	0,45	0,12 / 0,16 / 0,20 / 0,24	250	1010

5.2.4 Laine de roche

Dans le cas de l'ajout de laine de roche, représenté sur la Figure 5-9, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-9.



Figure 5-9 : Représentation de la laine de roche

Tableau 5-9 : Composition de la toiture avec de la laine de roche

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Laine de roche	0,40	0,12 / 0,16 / 0,20 / 0,24	40	30

5.2.5 Polystyrène extrudé

Dans le cas de l'ajout du polystyrène extrudé représenté sur la Figure 5-10, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-10.



Figure 5-10 : Représentation du polystyrène extrudé

Tableau 5-10 : Composition de la toiture avec du polystyrène extrudé

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Polystyrène extrudé	0,35	0,12 / 0,16 / 0,20 / 0,24	40	52

5.2.6 Polyuréthane

Dans le cas de l'ajout du polyuréthane, représenté sur la Figure 5-11, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-11.



Figure 5-11 : Représentation du polyuréthane

Tableau 5-11 : Composition de la toiture avec du polyuréthane

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Polyuréthane	0,25	0,12 / 0,16 / 0,20 / 0,24	32	56

5.2.7 Ouate de cellulose

Dans le cas de l'ajout de ouate de cellulose, représenté sur la Figure 5-12, nous avons rajouté cette épaisseur à l'intérieur du bâtiment et en voici la composition avec les différentes épaisseurs et caractéristiques thermiques sur le Tableau 5-12.



Figure 5-12 : Représentation de la ouate de cellulose

Tableau 5-12 : Composition de la toiture avec de la ouate de cellulose

Composition de la toiture	Conductivité thermique (W / m. K)	Épaisseur (m)	Masse volumique (kg/m ³)	Capacité thermique (kJ/m ³ .K)
Tuile	X	0,025	X	X
Lame d'air ventilée	X	0,02	X	X
Feutre bitumineux	0,36	0,005	145	217
Ouate de cellulose	0,38	0,12 / 0,16 / 0,20 / 0,24	30	57

5.3 Scénarios de remplacement du système de chauffage

5.3.1 Considérations générales

Les systèmes de chauffages que nous avons énuméré dans le Tableau 3-3 seront décrit dans ce chapitre.

Pour rappeler les hypothèses utilisées dans notre étude, aucun système de ventilation n'est prévu et ne sera pris en compte dans nos calculs. De plus, aucun système de refroidissement ne sera aussi pris en compte. Ce qui nous permet de nous concentrer uniquement sur les différents systèmes de chauffage. Pour ce qui est des coûts nous avons fait des recherches puis comparés en échangeant avec des professionnels, comme décrits dans le Chapitre 3 (Maison & Travaux, 2023), (Maridet, 2021), (Muret, 2019), (Izi by EDF, 2023), (Total Energies, 2023), (La prime Energie, 2023), (Zaffini, 2023), (Particuliers ENGIE, 2023).

5.3.2 Chaudière électrique

Nous avons fait le choix d'incorporer la chaudière électrique dans notre étude.

Une chaudière électrique est un appareil de chauffage utilisé pour produire de la chaleur en utilisant l'électricité comme source d'énergie. Contrairement aux chaudières fonctionnant au gaz ou au fioul, une chaudière électrique ne nécessite pas de brûler un combustible pour générer de la chaleur.

Les chaudières électriques sont disponibles dans une variété de modèles et de tailles pour répondre aux besoins de chauffage des différentes applications. Elles sont souvent utilisées pour le chauffage des maisons individuelles, des appartements, des bâtiments commerciaux et des installations industrielles.

Les chaudières électriques sont faciles à installer et ne nécessitent pas de stockage ou de raccordement à une source de combustible externe. Elles sont également plus compactes et plus silencieuses que les chaudières à combustion, ce qui les rend adaptées aux espaces restreints ou sensibles au bruit.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation d'une chaudière électrique entraîne une dépendance vis-à-vis de l'électricité comme source d'énergie. Cela peut entraîner des coûts d'exploitation plus élevés, en particulier dans les régions où le prix de l'électricité est élevé. De plus, la performance d'une chaudière électrique peut être affectée par les fluctuations du réseau électrique.

5.3.3 Chaudière à gaz

Nous avons fait le choix d'incorporer la chaudière à gaz à condensation dans notre étude.

Une chaudière à gaz à condensation est un appareil de chauffage qui utilise le gaz naturel comme source d'énergie pour produire de la chaleur. Elle est largement utilisée dans les foyers, les bâtiments commerciaux et industriels en raison de son efficacité et de sa disponibilité.

L'un des principaux avantages d'une chaudière à gaz à condensation est son rendement important. Grâce aux avancées technologiques, les chaudières modernes offrent un rendement énergétique relativement élevé, ce qui signifie qu'elles convertissent une grande partie du gaz en chaleur utile tout en minimisant les pertes. Cela se traduit par une consommation de gaz réduite et des économies d'énergie.

Les chaudières à gaz sont également appréciées pour leur réponse rapide et leur capacité à fournir une chaleur constante et confortable. Elles sont équipées de systèmes de régulation avancés qui permettent de contrôler avec précision la température et d'adapter la puissance de chauffage en fonction des besoins. Cela contribue à un confort thermique optimal et à une gestion efficace de l'énergie.

Une autre caractéristique attrayante des chaudières à gaz est leur compacité et leur facilité d'installation. Elles occupent moins d'espace par rapport à certains autres systèmes de chauffage et peuvent être intégrées de manière discrète dans les espaces de vie. De plus, elles ne nécessitent pas de réservoirs de stockage de combustible, ce qui simplifie davantage leur installation, car elle nécessite de se brancher directement sur le réseaux de la ville.

Sur le plan environnemental, les chaudières à gaz sont considérées comme relativement propres par rapport à certains autres systèmes de chauffage. Les nouvelles chaudières à gaz à condensation, en particulier, récupèrent la chaleur des fumées de combustion, ce qui réduit les émissions de gaz à effet de serre et contribue à une empreinte carbone plus faible.

Cependant, il est important de noter que l'utilisation d'une chaudière à gaz dépend de la disponibilité d'un approvisionnement en gaz naturel. Dans certaines régions, l'accès au gaz peut être limité ou coûteux, ce qui peut avoir un impact sur les coûts d'exploitation. De plus, comme toute combustion de combustible fossile, l'utilisation d'une chaudière à gaz contribue aux émissions de CO₂ et nécessite une ventilation adéquate pour assurer la sécurité.

5.3.4 Radiateur électrique

Les radiateurs électriques sont des appareils de chauffage faciles à utiliser. Ils fonctionnent en convertissant l'électricité en chaleur, offrant ainsi une solution pratique pour le chauffage des espaces résidentiels, commerciaux et professionnels. Ils sont faciles à installer, ils offrent un contrôle précis de la température et sont disponibles dans plusieurs tailles et designs pour s'adapter à tous les intérieurs. Avec leur sécurité intégrée et leur polyvalence, les radiateurs électriques offrent une solution de chauffage moderne et confortable, cependant sont très énergivores par rapport à d'autres solutions.

5.3.5 Air conditionné

Les chauffages à air conditionné, également connus sous le nom de pompes à chaleur réversibles Air/Air, offrent un moyen polyvalent de chauffer et de climatiser un espace, ce que nous ne détaillerons pas dans cette étude. Ils fonctionnent en utilisant un système de transfert de chaleur, où l'air est extrait de l'extérieur et chauffé avant d'être distribué dans l'espace intérieur. Ce système permet de chauffer efficacement les pièces tout en offrant également des fonctionnalités de refroidissement pendant les mois plus chauds, ce que nous n'utiliserons pas dans notre étude. Les chauffages à air conditionné sont réputés pour leur efficacité énergétique, car ils utilisent l'énergie thermique de l'air extérieur pour chauffer l'intérieur, ce qui réduit la consommation d'énergie par rapport aux systèmes de chauffage traditionnels. De plus, ils offrent un contrôle précis de la température et peuvent être utilisés pour chauffer des espaces de différentes tailles. Les chauffages à air conditionné sont donc une solution moderne et pratique pour le chauffage de divers espaces.

5.3.6 Pompe à chaleur Air/Eau

Les pompes à chaleur Air/Eau sont des systèmes de chauffage qui utilisent l'air extérieur comme source d'énergie pour chauffer. Elles fonctionnent en extrayant les calories de l'air extérieur, même par temps froid, et les transferts vers un circuit d'eau, qui distribue ensuite la chaleur à travers des radiateurs, des planchers chauffants ou un système de chauffage par le sol. Ces pompes à chaleur peuvent également inverser le cycle de fonctionnement pour fournir un refroidissement en été, ce qui ne sera pas pris en compte dans notre étude.

Les avantages des pompes à chaleur Air/Eau sont nombreux. Elles sont très efficaces sur le plan énergétique, car elles utilisent l'énergie renouvelable disponible dans l'air pour chauffer l'eau. Cela permet de réduire les coûts de chauffage et les émissions de carbone par rapport aux systèmes traditionnels.

5.3.7 Pompe à chaleur géothermie Eau/Air

Les pompes à chaleur géothermie Eau/Air sont des systèmes de chauffage qui utilisent l'énergie thermique stockée dans l'eau souterraine comme source de chaleur. Elles fonctionnent en extrayant la chaleur de l'eau souterraine à travers un échangeur de chaleur, puis en la transférant vers l'air qui est distribué dans le bâtiment pour le chauffer. Ces pompes à chaleur peuvent également inverser le cycle de fonctionnement pour fournir un refroidissement en été, ce qui ne sera pas pris en compte dans notre étude.

Les avantages des pompes à chaleur géothermie Eau/Air sont nombreux. Elles sont extrêmement efficaces sur le plan énergétique, car elles utilisent une source d'énergie renouvelable et stable, le souterrain, qui maintient une température constante tout au long de l'année. Cela permet de réduire considérablement les coûts de chauffage par rapport aux systèmes traditionnels. De plus, elles offrent un confort plus grand grâce à une diffusion homogène de la chaleur dans tout le bâtiment.

Les pompes à chaleur géothermie Eau/Air sont également respectueuses de l'environnement. Elles ne nécessitent pas de combustibles fossiles et n'émettent pas de gaz à effet de serre lors de leur fonctionnement. De plus, elles sont silencieuses et ne produisent pas de nuisances sonores, contrairement aux autres pompes à chaleur avec une unité extérieure.

Ces systèmes sont durables et nécessitent peu d'entretien. L'énergie géothermique est une ressource stable et fiable, et les composants de la pompe à chaleur sont conçus pour durer de nombreuses années avec un entretien minimal.

5.3.8 Pompe à chaleur géothermie Eau/Eau

Nous avons fait le choix d'incorporer la pompe à chaleur géothermie Eau/Eau dans notre étude.

Les pompes à chaleur géothermie Eau/Eau sont des systèmes de chauffage exploitent l'énergie thermique présente dans les nappes phréatiques ou les puits géothermiques. Elles fonctionnent en extrayant la chaleur du souterrain à travers un échangeur de chaleur, puis en la transférant vers un fluide caloporteur, tel qu'un mélange d'eau et d'antigel. Ce fluide transporte ensuite la chaleur vers l'échangeur thermique du bâtiment, où elle est utilisée pour chauffer l'air ou l'eau du système de chauffage.

Les avantages des pompes à chaleur géothermie Eau/Eau sont nombreux. Elles sont extrêmement efficaces sur le plan énergétique, car elles exploitent une source d'énergie renouvelable et constante : le souterrain. Les nappes phréatiques

conservent une température relativement stable tout au long de l'année, ce qui permet à la pompe à chaleur de fournir un chauffage efficace, même pendant les saisons les plus froides. De plus, ces systèmes peuvent être réversibles et fournir également une climatisation en été, ce qui ne sera pas pris en compte dans notre étude.

Les pompes à chaleur géothermie Eau/Eau sont respectueuses de l'environnement. Elles n'émettent pas de gaz à effet de serre lors de leur fonctionnement, car elles ne brûlent pas de combustibles fossiles. Elles sont également silencieuses et ne produisent pas de nuisances sonores.

Ces systèmes sont durables et ont une longue durée de vie. La géothermie est une source d'énergie stable et fiable, et les composants des pompes à chaleur sont conçus pour être robustes et résistants. De plus, leur fonctionnement requiert un entretien régulier, mais relativement simple.

5.4 Scénarios d'ajout de panneaux photovoltaïques

5.4.1 Considérations générales

Les panneaux photovoltaïques sont la dernière catégorie de variable mise en jeu dans notre étude. Nous travaillerons avec ces panneaux sur seulement un pan de toiture de la maison, le pan le mieux orienté en fonction du soleil. Nous considérons qu'aucune ombre gênante viendra s'appliquer sur ces panneaux, que ça soit de la végétation ou même un autre bâtiment avoisinant plus grand.

Pour les différents panneaux photovoltaïques qui seront installés, nous avons pris un coefficient de rendement avec une valeur moyenne de ce qui est fait et installé en France, c'est-à-dire des panneaux photovoltaïques ayant un coefficient de rendement de 20%.

De plus, il ne faut compter que la partie auto-consommé par le bâtiment dans certains calculs de la RE 2020. C'est pour cela que nous avons rajouter un coefficient de 50% d'auto-consommée sur la production totale, car c'est une valeur moyenne française.

La surface utilisable de la toiture est de 64,60 m² et nous avons décidé de séparer en quart la toiture, c'est-à-dire 16,15 m². Par conséquent, nous avons fait le choix de parcourir ces différentes options en allant de aucun panneau photovoltaïque, à un quart de la toiture, la moitié, les trois quarts de la toiture et la totalité de la toiture couverte par les panneaux.

5.4.2 Pas de panneaux

Dans ce cas de figure nous avons rentré aucune production de panneaux photovoltaïques dans le modèle.

5.4.3 ¼ de la toiture

Pour ce qui est d'utiliser seulement un quart de la toiture pour les panneaux photovoltaïques, cela revient à utiliser 16,15 m² de la totalité de la toiture, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5-13.

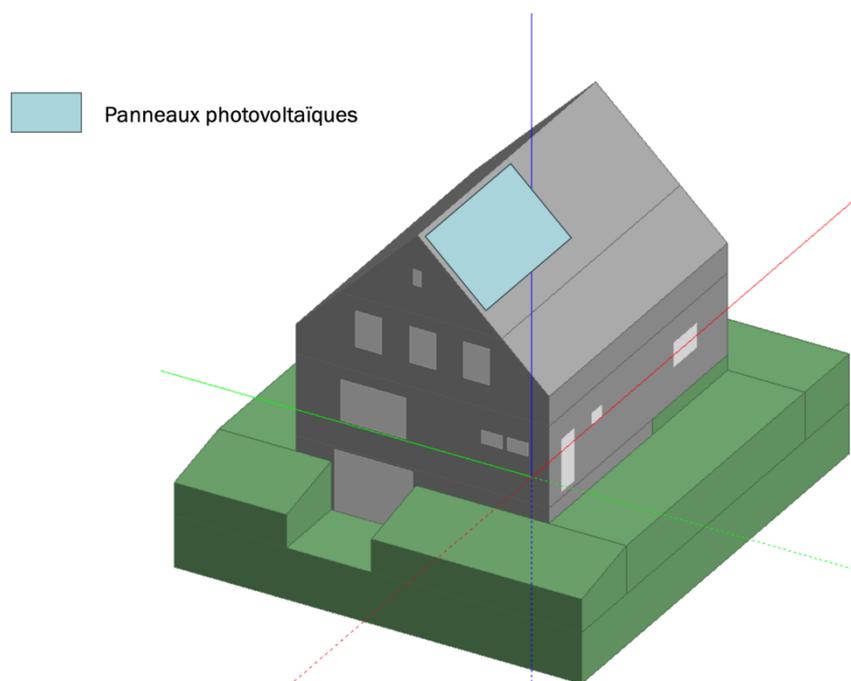


Figure 5-13 : Représentation de la surface PV 2 des panneaux photovoltaïques

5.4.4 ½ de la toiture

Pour ce qui est d'utiliser seulement la moitié de la toiture pour les panneaux photovoltaïques, cela revient à utiliser 32,30 m² de la totalité de la toiture, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5-14.

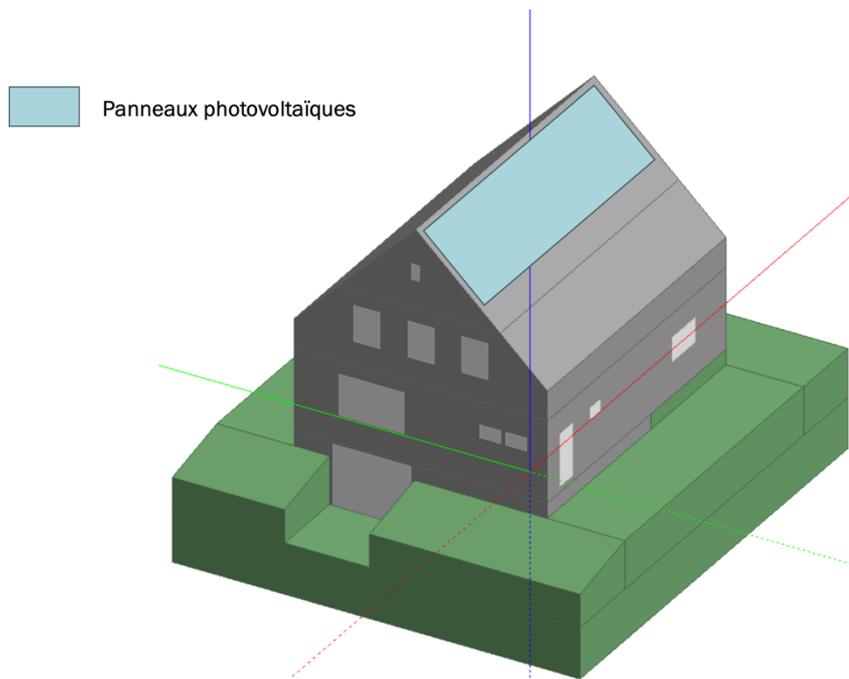


Figure 5-14 : Représentation de la surface PV 3 des panneaux photovoltaïques

5.4.5 ¾ de la toiture

Pour ce qui est d'utiliser seulement la moitié de la toiture pour les panneaux photovoltaïques, cela revient à utiliser 48,45 m² de la totalité de la toiture, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5-15.

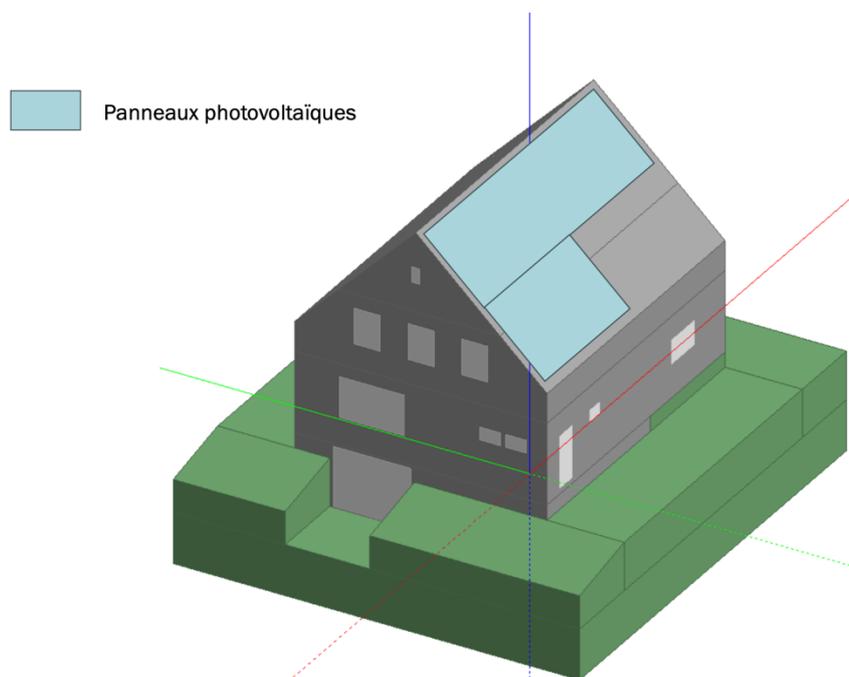


Figure 5-15 : Représentation de la surface PV 4 des panneaux photovoltaïques

5.4.6 Totalité de la toiture

Pour ce qui est d'utiliser seulement la moitié de la toiture pour les panneaux photovoltaïques, cela revient à utiliser 64,60 m² de la totalité de la toiture, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5-16.

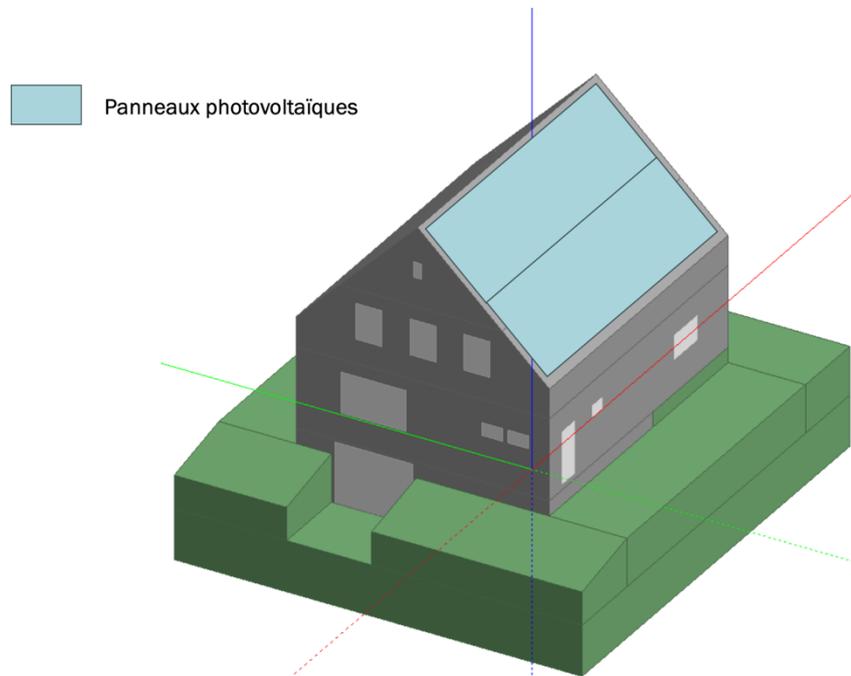


Figure 5-16 : Représentation de la surface PV 5 des panneaux photovoltaïques

Ce sont donc tous les différents scénarios qui pourront être parcourus par le logiciel pour permettre d'obtenir des combinaisons de scénario, de solution qui seront optimales.

6 Résultats

6.1 Résultat de l'optimisation par étape

Pour commencer, nous allons chercher une optimisation la plus rapide et la plus efficace. Ce choix est fait, car il serait souhaitable de pouvoir renouveler cette opération avec d'autres bâtiments ou même d'autres conditions initiales. Cette étape a pour but de développer l'optimisation en sous optimisation, que l'on découpera en trois parties. La première qui sera l'enveloppe, la seconde qui sera le système de chauffage et finalement la dernière qui sera les panneaux photovoltaïques, c'est-à-dire tout ce qui est énergie renouvelable. Nous optimiserons pour chacune de ces grandes parties, le coût de construction du bâtiment exprimé en euros avec soit l'émission de CO₂ opérationnelle exprimé en kg équivalent, soit la consommation nette d'énergie du bâtiment exprimé en kWh équivalent. Tout cette opération est réalisée sur une période d'un an.

6.1.1 Résultat de l'optimisation de l'enveloppe

Concernant l'optimisation de l'enveloppe, celle-ci viendra seulement prendre en compte l'isolation rajouté sur les murs en contact avec l'extérieur mais aussi avec l'isolation rajoutée en toiture. Cette optimisation est réalisée à partir des variables et des hypothèses précédemment définies.

Nous avons pu parcourir toutes les combinaisons de solutions possibles et obtenir les résultats du Tableau 6-1, en ne comparant que le coût de construction du bâtiment ainsi que l'émission de CO₂ opérationnelle. Cela permet donc de voir les meilleures combinaisons de solutions. On observe ici que les valeurs de CO₂ sont encore très importantes, bien au-dessus des 800 kg équivalent (valeur seuil de la RE 2020 expliqué Chapitre 1 et 4), et que le coût ne varie que de quelques milliers d'euros (environ 4 000 €) entre ces dernières solutions. On observe aussi que dans ces résultats, l'épaisseur de l'isolant en toiture est toujours bien plus épais que celui appliqué au mur.

Tableau 6-1 : Optimisation de l'enveloppe pour minimiser le coût total et le CO₂

Mur extérieur	Toiture	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)
Laine de verre 12	Ouate de cellulose 16	357 686	7460
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	359 244	7382
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	361 555	7353

En ce qui concerne l'optimisation de l'enveloppe en prenant seulement en compte le coût et l'énergie nette, on obtient les résultats du Tableau 6-2 et on se retrouve dans les mêmes grandeurs pour le coût, cependant pour la consommation d'énergie nous nous rapprochons de la valeur seuil de la RE 2020 qui est de 20 000 kWh. De même

que pour le résultat précédemment, l'isolant en toiture reste plus épais que celui appliqué sur les murs.

Tableau 6-2 : Optimisation de l'enveloppe pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Mur extérieur	Toiture	Coût Total (€)	Energie nette (kWh)
Ouate de cellulose 16	Ouate de cellulose 16	357 686	22410
Laine de verre 12	Ouate de cellulose 24	359 244	21994
Ouate de cellulose 16	Polystyrène extrudé 24	361 555	21838

Dans cette configuration d'optimisation de l'enveloppe, les résultats pour la toiture correspondent entre les deux précédents optimisations Tableau 6-1 et Tableau 6-2. La ouate de cellulose est très présente, environ 50 % des isolants, avec deux épaisseurs différentes. Cependant pour les murs extérieurs, cela varie beaucoup plus et donc laissera beaucoup plus de possibilité pour l'optimisation finale. On retrouve bien sûr la ouate de cellulose avec différentes épaisseurs mais aussi le polystyrène extrudé, qui lui est présent à 25 %, la laine de verre, à 17 %, et finalement la laine de roche, à 8 %. Pour le coût, on reste dans les mêmes ordres de grandeurs, mais on observe que l'ajout d'isolant en toiture et sur les murs extérieurs augmentes très rapidement le coût du bâtiment, on observe cela en le comparant avec le coût de base du bâtiment, qui est de 341 278 €. Finalement l'énergie et le CO₂ n'atteignent pas encore les valeurs désirées, mais cela peut encore évoluer en les liants à d'autres solutions que nous allons étudier par la suite.

6.1.2 Résultat de l'optimisation du chauffage

On peut continuer ensuite sur la seconde grande partie du bâtiment qui est l'optimisation du système de chauffage. On viendra donc seulement faire varier le système avec les différents choix que l'on a pu faire précédemment et avec toutes les hypothèses définies dans les parties précédentes.

Dans la même continuité que l'optimisation de l'enveloppe, on commence en optimisant les différentes solutions en comparant le coût total et l'émission de CO₂. Nous obtenons les résultats du Tableau 6-3. On observe directement que par rapport à la précédente optimisation, le cout est beaucoup plus élevé. Nous avons une augmentation d'environ 45 000 € pour les solutions les plus couteuses et l'émission de CO₂ est beaucoup plus faible, une diminution de 13 355 kg équivalent pour les mêmes solutions. Il faut bien prendre en considération que ces solutions sont prises indépendamment des autres, il sera donc nécessaire de réaliser une optimisation globale permettant de comparer toutes les variables ensembles, en combinaison.

Tableau 6-3 : Optimisation du système de chauffage pour minimiser le coût total et le CO₂

Système de chauffage	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)
Radiateurs électriques	354 027	16277
PAC Air/Eau	369 966	10821
PAC Géothermie Eau/Air	401 844	9192
PAC Géothermie Eau/Eau	405 032	8483

Pour ce qui est des résultats ne prenant en compte que le coût total et l'énergie nette, il très vite observable sur le Tableau 6-4 que la consommation d'énergie nette du bâtiment de certaines solutions passe sous le seuil défini par la RE 2020 (20 000 kWh), ce sont les solutions de chauffage par géothermie. Ce qui n'avait pas été atteint dans la précédente optimisation. On observe les mêmes résultats que ça soit pour les systèmes de chauffages, que pour les prix avec le Tableau 6-3. Dans ces deux optimisations, le coût varie de plus de 50 000 € entre les différentes solutions. Ainsi ce choix de solutions aura un impact important sur le coût final mais aussi sur le CO₂ et sur l'énergie, comme on a pu le constater précédemment.

Tableau 6-4 : Optimisation du système de chauffage pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Système de chauffage	Coût Total (€)	Energie nette (kWh)
Radiateurs électriques	354 027	29246
PAC Air/Eau	369 966	20242
PAC Géothermie Eau/Air	401 844	17533
PAC Géothermie Eau/Eau	405 032	16384

Dans cette configuration d'optimisation du système de chauffage du bâtiment, les résultats sont identiques concernant le choix du système de chauffage et le coût bien évidemment. Il en ressort quatre principaux, les radiateurs électriques, qui est moins couteux mais plus énergivore, la Pompe à Chaleur Géothermie Eau/Air et la Pompe à Chaleur Géothermie Eau/Eau qui sont les systèmes les plus couteux et cependant les moins énergivores pendant l'année d'étude. Finalement, le système, qui se trouve entre ces trois systèmes extrêmes dans leurs valeurs, est la Pompe à Chaleur Air/Eau qui a un prix moyen entre les deux extrêmes, soit un coût total de 369 966 € et à une consommation aussi moyenne. Il sera nécessaire d'associer ces quatre solutions avec le reste des solutions choisies pour permettre une meilleure optimisation et donc de meilleurs résultats.

6.1.3 Résultat de l'optimisation des panneaux photovoltaïques

Nous pouvons passer sur la dernière optimisation par étape avant de faire l'optimisation finale, regroupant les meilleures combinaisons de solutions. Dans celle-ci nous étudierons les solutions des panneaux solaires en les faisant varier tout en considérant les hypothèses décrites précédemment.

Tout comme les précédentes optimisations, nous commencerons par optimiser les différentes solutions de panneaux photovoltaïques retenus avec le coût du bâtiment et l'émission de CO₂. Nous obtenons les résultats du Tableau 6-5. On observe que les résultats sont linéaires. Ce qui semble logique car nous changeons seulement la dimension totale de la surface utilisée par les panneaux photovoltaïques. Nous pouvons aussi voir qu'en venant intervenir seulement sur les panneaux photovoltaïques du projet, cela permet déjà d'obtenir des résultats intéressants pour la RE 2020. On se retrouve très rapidement avec des valeurs beaucoup plus faibles que celle du bâtiment de base. Cependant les coûts sont plus importants que toutes les précédentes optimisations et un écart encore plus grand avec le bâtiment existant.

Tableau 6-5 : Optimisation des panneaux photovoltaïques pour minimiser le coût total et le CO₂

Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO₂ (eq kg)
Pas de production	341 278	9267
¼ de la toiture	351 565	8177
½ de la toiture	361 253	7088
¾ de la toiture	370 941	5998
Toiture entière	380 629	4908

Nous passons à l'optimisation des panneaux photovoltaïques, avec le Tableau 6-6, en ne prenant en compte que le coût et la consommation d'énergie nette du bâtiment. Après toutes les précédentes analyses que nous avons pu faire, c'est celle-ci qui obtient la valeur de consommation la plus faible, mais aussi une des plus élevée. Cette partie montre bien que les panneaux photovoltaïques sont très importants dans la réduction de l'énergie nette. Nous avons obtenu comme l'optimisation précédente, une réduction linéaire de la consommation, ce qui semble normal. Ainsi avoir la valeur la plus basse et une des plus haute permet de dire que les panneaux photovoltaïques seront très importants pour la suite des optimisations.

Tableau 6-6 : Optimisation des panneaux photovoltaïques pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	Energie nette (kWh)
Pas de production	341 278	27560
¼ de la toiture	351 565	25762
½ de la toiture	361 253	23964
¾ de la toiture	370 941	22166
Toiture entière	380 629	20368

Finalement, cette partie ne nous permet pas de trouver la ou les solutions les plus importantes mais nous comprenons que la production d'énergie via les panneaux photovoltaïques aura un fort impact sur les résultats futurs. Il sera nécessaire de la compléter avec d'autres solutions pour arriver à des valeurs sous les seuils attendus.

6.1.4 Sélection des scénarios

Après avoir réalisé ces différentes optimisations, que ça soit pour l'enveloppe, pour le système de chauffage ou pour les panneaux photovoltaïques, les résultats sont variés et chaque optimisation permet d'obtenir des conclusions très différentes. Or dans cette sélection, nous resterons dans les lignes de notre méthodologie, et nous choisirons seulement les variables qui sont ressorties comme optimale avec le logiciel Design Builder. C'est-à-dire qu'elles se trouvent sur le front de Pareto des résultats de l'optimisation. Nous allons donc pouvoir parcourir les trois différentes parties et définir les prochaines variables que nous allons pouvoir faire travailler ensemble pour l'optimisation finale et qui sont regroupé dans le Tableau 6-7.

Tableau 6-7 : Récapitulatif des variables retenues pour l'optimisation finale

Murs extérieurs	Toiture	Système de chauffage	Panneaux photovoltaïques
Laine de verre 12	Ouate de cellulose 16	Radiateurs électriques	Pas de production
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	¼ de la toiture
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Air	½ de la toiture
Ouate de cellulose 16		PAC Géothermie Eau/Eau	¾ de la toiture
			Toiture entière

6.1.5 Résultat de l'optimisation

Après avoir sélectionné les solutions les plus favorables, il est nécessaire de finaliser l'opération en les faisant dialoguer ensemble et en venant parcourir toutes les combinaisons possibles, afin de déterminer les meilleures combinaisons de solutions. Cette opération a donc pu être réalisée par la suite, de la même façon que les précédentes optimisations. Cependant, cette fois-ci, le nombre de paramètres est plus important. Nous venons modifier la composition des murs extérieurs, la composition de la toiture, le système de chauffage et aussi l'ajout ou non de panneaux photovoltaïques. Beaucoup de critères sont à prendre en compte, ainsi ce sont des optimisations plus complexes et plus longues que les précédentes.

Nous avons donc commencé par l'optimisation du coût et de l'émission de CO₂. Nous avons obtenu les résultats représentés sur la Figure 6-1. Nous pouvons directement observer que les résultats sont regroupés en sept groupes qui sont très proches du front de Pareto et quatre autres groupes plus en arrière, qui seront moins intéressants pour nous. Sur chacun des sept groupes, quatre ou cinq combinaisons ressortent à chaque fois et le reste du groupe est soit plus coûteux et/ou émet plus de CO₂.

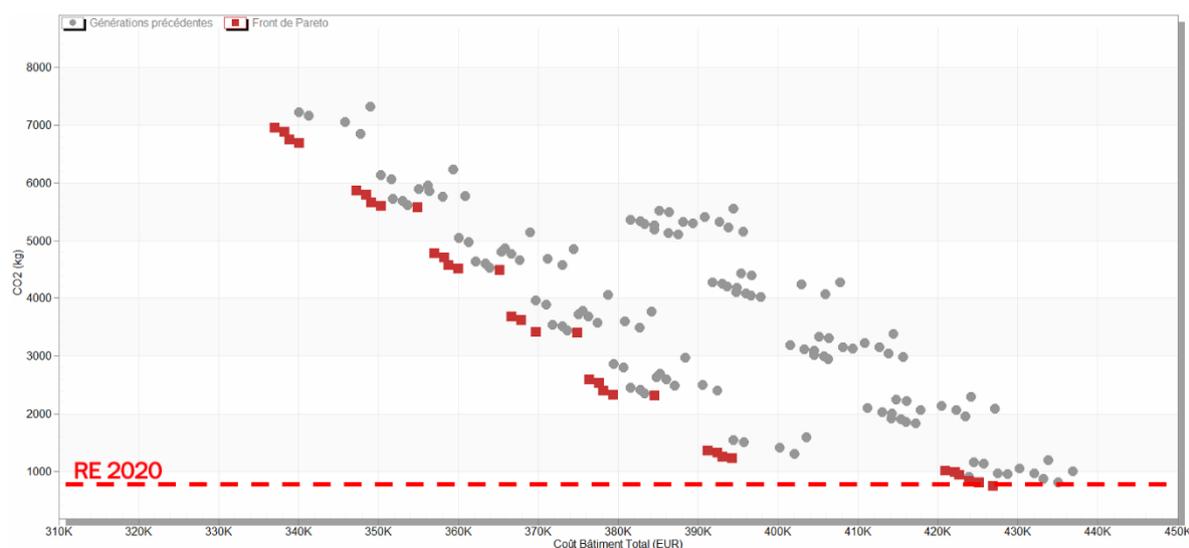


Figure 6-1 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et le CO₂

Nous pouvons maintenant observer sur le Tableau 6-8, les résultats obtenus de l'optimisation et donc de la Figure 6-1 qui est en direct lien avec ce Tableau. Les valeurs décrites en rouge dans la Figure 6-1 sont les valeurs reprises et détaillées dans le Tableau 6-8.

On peut donc voir que les sept groupes sont en fait déterminés par les panneaux photovoltaïques principalement mais aussi le système de chauffage. On y repère rapidement une correspondance avec le Tableau 6-5 : des panneaux photovoltaïques, qui ont des valeurs linéaires. De plus, les cinq groupes, ayant

l'émission de CO₂ la plus importante, correspondent au même système de chauffage (radiateurs électriques) et est dû à la variation de la surface des panneaux photovoltaïques. Dans ces cinq groupes, une combinaison est plus chère, c'est celle avec la PAC Air/Eau. Finalement les deux derniers groupes sont représentatif de la PAC Air/Eau, la PAC Géothermie Eau/Air et la PAC Géothermie Eau/Eau.

Les murs extérieurs et la toiture aussi changent mais ne font varier que très peu, comme nous avons pu le voir dans les optimisations de l'enveloppe, Tableau 6-1 et Tableau 6-2. Nous pouvons donc en déduire qu'une grande partie des autres points derrière le front de Pareto sont des essais des différentes compositions de mur et de toiture, ce qui créer des groupes comme représenté dans la Figure 6-1. On en conclu cela, car d'après les optimisations précédentes le changement de compositions des parois ne fait varier que très peu l'émissions de CO₂ entre elles. Mais n'oublions pas qu'elles réduisent drastiquement l'émission par rapport au bâtiment de base.

Finalement on peut observer que seulement une combinaison respecte le seuil de la RE 2020 concernant l'émission de CO₂.

Tableau 6-8 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et le CO₂

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 043	6952
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 268	6887
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 847	6752
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	340 072	6686
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 330	5862
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	348 555	5797
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	349 134	5662
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	350 359	5597
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Pas de production	354 914	5579
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	357 018	4773
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 242	4707
Polystyrène	Ouate de cellulose	Radiateurs	½ de la toiture	358 822	4573

extrudé 16	24	électriques				
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	360 046	4507	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	¼ de la toiture	365 200	4489	
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 706	3683	
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	367 930	3618	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	369 734	3417	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	½ de la toiture	374 888	3400	
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 394	2594	
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	377 618	2528	
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	378 198	2393	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	379 422	2328	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	¾ de la toiture	384 576	2310	
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	391 235	1359	
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	392 460	1324	
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	393 039	1255	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	394 264	1220	
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	420 919	1006	
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	422 144	980	
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	422 723	929	
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	423 888	830	
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	425 112	808	
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	426 916	746	

Nous avons ensuite réalisé la même optimisation en comparant le coût et l'énergie consommés. Nous obtenons donc un résultat de la Figure 6-2 ressemblant fortement à la Figure 6-1, c'est-à-dire en 7 groupes sur le front de Pareto et 4 autres qui se trouvent plus en arrière.

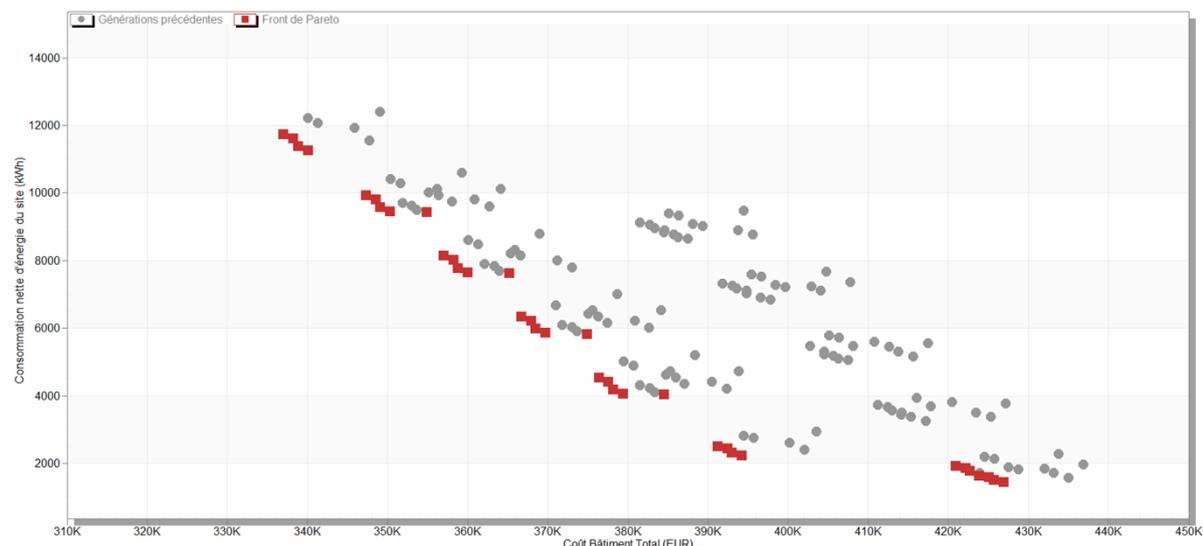


Figure 6-2 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Nous pouvons détailler la Figure 6-2 à l'aide du Tableau 6-9 qui représente la même optimisation. De même que pour le Tableau 6-8, la répartition du système de chauffage et des panneaux photovoltaïques est la même. La variation se trouve surtout au niveau des murs extérieurs et de la toiture. On peut observer le même phénomène que sur le Tableau 6-1 et le Tableau 6-2, il y a un changement de composant entre l'optimisation de l'émission de CO₂ avec le coût et l'optimisation de la consommation d'énergie nette avec le coût. Ce qui est l'opposé de toutes les autres variables qui ne variaient pas entre les deux optimisations. Cela semble donc normal qu'on retrouve aussi cette différence au niveau de notre optimisation par étape.

Dans cette optimisation toutes les combinaisons se retrouvent au-dessous du seuil fixé par la RE 2020 qui est de 20 000 kWh.

Tableau 6-9 : Optimisation par étape pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	Energie nette (kWh)
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 043	11730
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 268	11606
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 847	11370
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	340 072	11246
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 330	9932
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	348 555	9807
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	349 134	9572
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	350 359	9448
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Pas de production	354 914	9419
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	357 018	8134
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 242	8009
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 822	7774
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	360 046	7650
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	¼ de la toiture	365 200	7621
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 706	6336
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	367 930	6211
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	368 510	5976
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	369 734	5852
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	½ de la toiture	374 888	5823
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 394	4538
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	377 618	4413
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	378 198	4178

Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	379 422	4054
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	¾ de la toiture	384 576	4025
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	391 235	2501
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	392 460	2427
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	393 039	2300
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	394 264	2227
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	420 919	1917
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	422 144	1858
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	422 723	1762
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	423 888	1628
Laine de roche 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	425 112	1575
Polystyrène extrudé 16	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	425 692	1495
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	426 916	1443

On peut donc conclure de ces deux dernières optimisations qu'elles représentent bien les précédentes optimisations sur l'enveloppe, sur le système de chauffage et sur les panneaux photovoltaïques. Elles sont cohérentes car nous avons pu voir que les éléments les plus importants étaient les panneaux photovoltaïques et nous retrouvons bien les combinaisons qui ont été regroupé par groupe de panneaux photovoltaïques.

Puis une autre variation importante qui était celle du système de chauffage que l'on retrouve aussi car une grande partie des groupes se trouvant à l'arrière du front de Pareto est dû aux différentes PAC. La partie la moins couteuse et sur le front de Pareto correspond en majorité au système de chauffage par radiateur électrique. Contrairement à la partie la plus cher, la moins consommatrice d'énergie et d'émettrice de CO₂, qui est composée des différentes PAC.

Pour ce qui est des compositions des murs extérieurs et de la toiture, cela revient au même que les précédentes optimisations, il n'y a pas une grande variation, c'est donc cela qui vient créer les différents groupes. C'est le système de chauffage et les panneaux photovoltaïques qui vont fixer l'ordre de grandeur pour le coût et pour l'émission ou la consommation, puis ces différentes variations de compositions vont rester dans cet ordre de grandeur.

6.2 Résultat de l'optimisation globale

Nous pouvons maintenant réaliser en parallèle de ce que nous avons fait précédemment l'optimisation globale, c'est-à-dire l'optimisation de toutes les variables sans faire de présélection au préalable. Il s'agira là de voir les différences avec notre précédente méthode d'optimisation. De la même façon nous optimiserons le coût avec deux facteurs différents, l'émission de CO₂ opérationnel et la consommation d'énergie nette du bâtiment.

La Figure 6-3 est le résultat de notre première optimisation globale en minimisant le coût et le CO₂ émis. On observe tout de suite un nombre plus important de points, ce qui est représentatif du fait qu'on a pris toutes les variables choisies au départ. On y retrouve les groupes sur le front de Pareto mais pas du tout sur le reste du graphique.

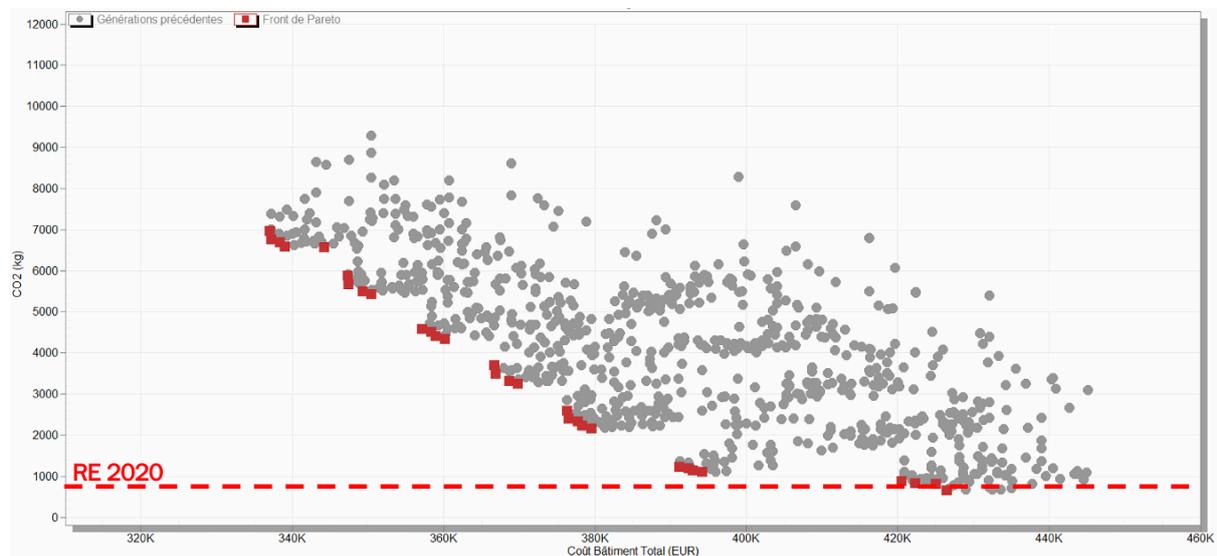


Figure 6-3 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et le CO₂

On obtient ensuite le Tableau 6-10 qui est le détail de la Figure 6-3. Nous retrouvons la même distribution que les précédentes optimisations, seulement les groupes sont cette fois-ci encore plus réguliers qu'avant. Il y a sept groupes qui sont finalement regroupables en quatre groupes, un pour chaque solution de panneaux photovoltaïques. Et pour le dernier groupe le système de chauffage vient changer les résultats. Les trois premiers groupes ont pour système de chauffage les

radiateurs électriques. Cependant le dernier groupe, celui qui a une émission de CO₂ la plus faible, est composé des radiateurs électriques mais aussi des différentes PAC en allant de la PAC Air/Eau à la PAC Géothermie Eau/Air puis Géothermie Eau/Eau.

Concernant les compositions des murs extérieurs et de la toiture, cela reste comme les précédentes optimisations, elles ne font varier que très peu les résultats, mais permettent de réduire le coût et l'émission de CO₂ par rapport au bâtiment de base.

Par rapport aux optimisation par partie, on obtient des émissions de CO₂ plus faible avec des coûts plus faibles également pour certaines valeurs. Cela reste aussi à vérifier pour l'énergie.

Tableau 6-10 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et le CO₂

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 043	6952
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 211	6746
Ouate de cellulose 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 414	6689
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	Pas de production	339 010	6578
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 20	Radiateurs électriques	Pas de production	344 238	6566
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 330	5862
Laine de verre 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 498	5657
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	349 297	5488
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	350 500	5424
Laine de verre 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	357 186	4568
Ouate de cellulose 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 389	4509
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 985	4399
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	360 188	4334
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 706	3683

Laine de verre 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 873	3478
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	368 673	3309
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	369 876	3245
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 394	2594
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 561	2388
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	377 765	2324
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	378 360	2219
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	379 564	2155
Laine de verre 20	Laine de verre 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	391 229	1218
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	392 433	1183
Polystyrène extrudé 20	Laine de verre 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	393 029	1130
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	394 232	1095
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	420 566	882
Polystyrène extrudé 20	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	422 365	817
Laine de roche 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	425 112	808
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	426 502	641

Pour terminer, la dernière optimisation réalisée est celle des coûts et de l'énergie consommée nette du bâtiment, représentée la Figure 6-4. De même que pour la précédente optimisation, un grand nombre de point est présent, et on y retrouve aussi sept groupes différents, qui sont représentatif des mêmes éléments que la Figure précédente.

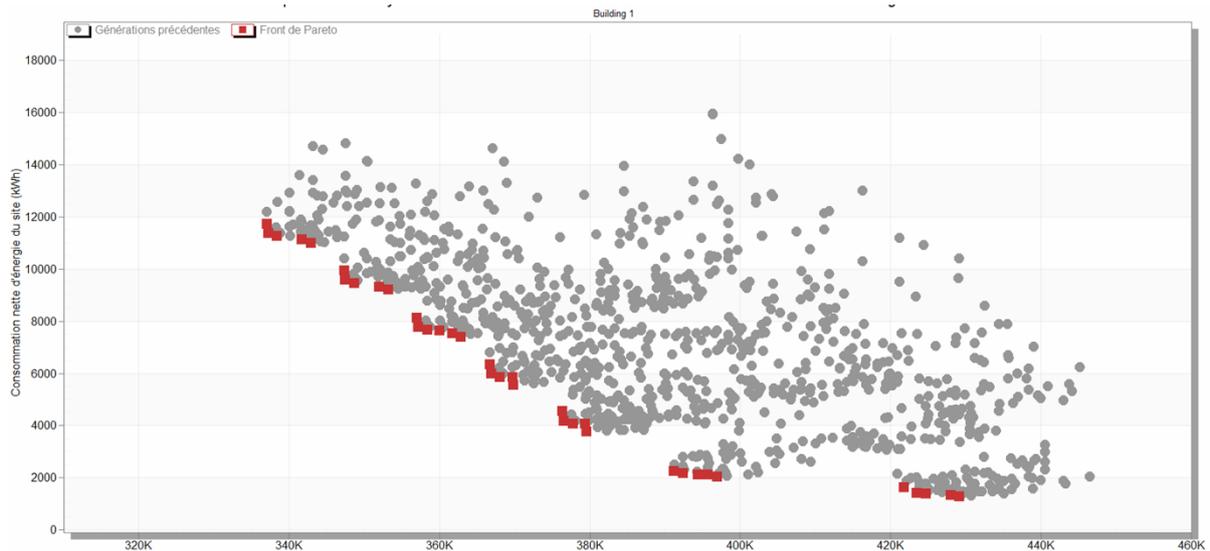


Figure 6-4 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et l'énergie nette

On obtient le dernier détail de nos optimisation qui est le Tableau 6-11 représentant la Figure 6-4. Ici, on se retrouve dans la même situation que l'optimisation de l'émission de CO₂, c'est-à-dire avec ce même système de groupe que nous avons pu voir sur le Tableau 6-10. Cependant sur ces mêmes résultats, nous obtenons des combinaisons de solutions bien en dessous du seuil de 20 000 kWh, la première valeur atteint déjà 11 731 kWh et descend jusqu'à 1 278 kWh.

Par rapport aux optimisation par partie, on obtient des consommations d'énergie plus faibles avec des coûts plus faibles pour certaines valeurs également. Ce qui est le même cas que pour le CO₂.

Tableau 6-11 : Optimisation globale pour minimiser le coût total et l'énergie nette

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	Energie nette (kWh)
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 043	11731
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337 211	11376
Ouate de cellulose 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	338 414	11263
Polyuréthane 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	341 709	11120
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Pas de production	342 912	10998
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 330	9933
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	347 498	9578
Ouate de cellulose 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	348 701	9465
Polyuréthane 20	Laine de verre 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	351 996	9323
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¼ de la toiture	353 199	9200
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	357 018	8135
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	357 186	7780
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	358 389	7660
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	360 046	7651
Polyuréthane 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	361 684	7523
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	½ de la toiture	362 887	7402
Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 706	6337
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	366 873	5982
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	368 077	5861
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	369 734	5853
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	¾ de la toiture	369 876	5557

Laine de roche 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 394	4539
Laine de verre 20	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	376 561	4184
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	377 765	4063
Polystyrène extrudé 16	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	379 422	4054
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	Radiateurs électriques	Toiture entière	379 564	3759
Laine de verre 20	Laine de verre 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	391 229	2253
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	392 433	2180
Polystyrène extrudé 20	Laine de roche 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	394 385	2122
Polyuréthane 20	Laine de verre 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	395 727	2110
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Air/Eau	Toiture entière	396 931	2037
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Air	Toiture entière	421 769	1641
Ouate de cellulose 20	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	423 499	1424
Laine de verre 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	424 703	1373
Polyuréthane 20	Ouate de cellulose 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	427 997	1329
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	429 201	1278

Finalement, nous avons pu parcourir différentes optimisations en passant par une optimisation par partie, puis une optimisation globale. Ce qui nous a mené vers des résultats assez similaires, mais tout de même différents. Cela montre bien que la façon d'optimiser les variables et indicateurs choisis préalablement a un impact sur les résultats finaux.

Nous pouvons finalement résumer ces derniers résultats dans le Tableau récapitulatif 6-12 et en observer le pourcentage d'apparition de ces éléments dans la Figure 6-5 pour l'isolation des murs extérieurs, la Figure 6-6 pour l'isolation de la toiture, la Figure 6-7 pour les systèmes de chauffage et pour finir la Figure 6-8 pour les panneaux photovoltaïques.

Tableau 6-12 : Tableau récapitulatif des résultats de l'optimisation globale

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques
Laine de roche (20)	Laine de roche (24)	Radiateurs électriques	Pas de production
Laine de verre (20)	Laine de verre (24)	PAC Air/Eau	¼ de la toiture
Ouate de cellulose (20)	Ouate de cellulose (24)	PAC Géothermie Eau/Air	½ de la toiture
Polystyrène extrudé (16 / 20)	Polystyrène extrudé (20 /24)	PAC Géothermie Eau/Eau	¾ de la toiture
Polyuréthane (20)			Toiture entière

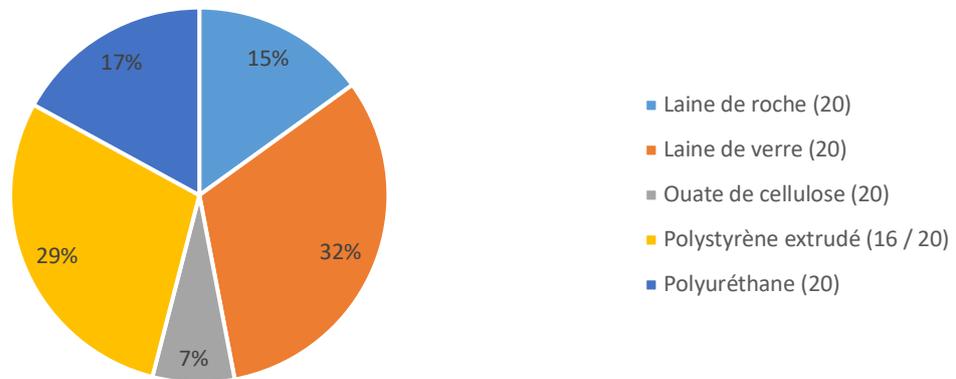


Figure 6-5 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour l'isolation des murs extérieurs

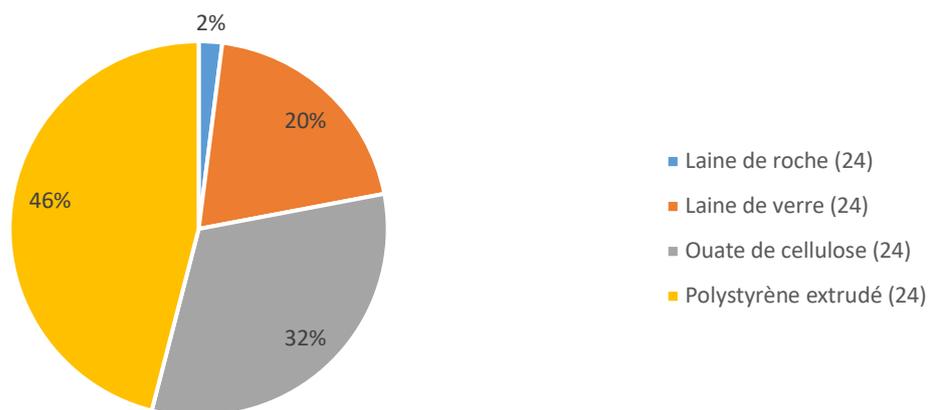


Figure 6-6 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour l'isolation de la toiture

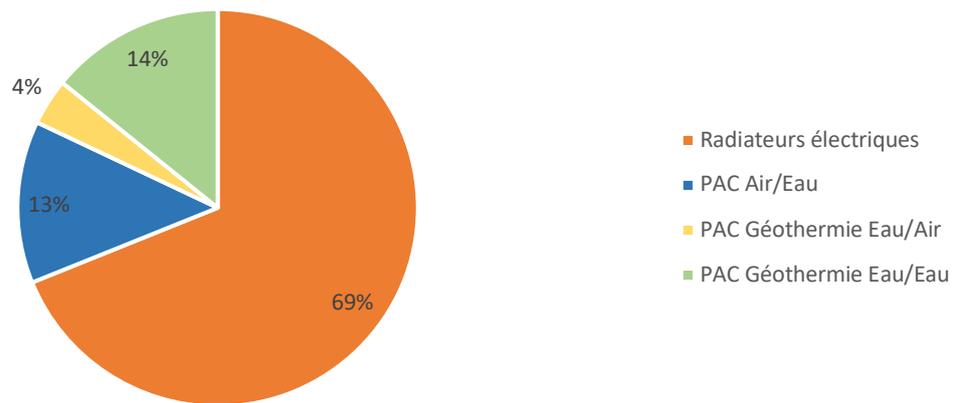


Figure 6-7 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour les systèmes de chauffage

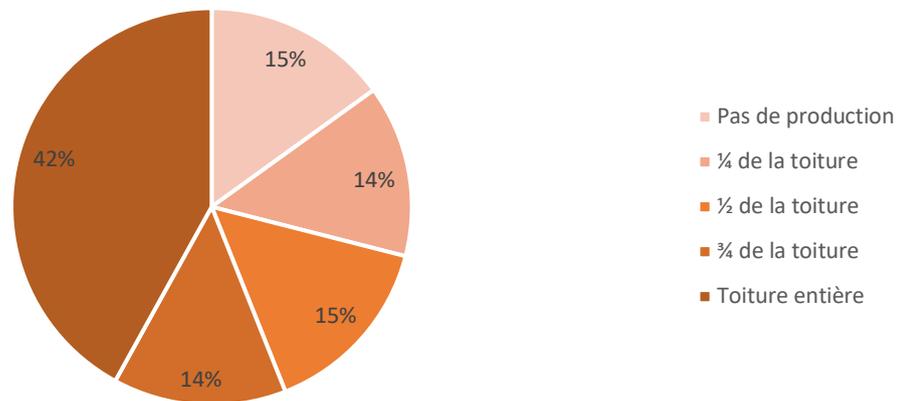


Figure 6-8 : Pourcentages des solutions optimales utilisées pour les panneaux photovoltaïques

7 Discussion

7.1 Rappel de l'objectif de l'étude

Ce chapitre vise à répondre aux questions de recherche posées dans le cadre de cette étude sur l'analyse des coûts optimaux pour la rénovation de bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (transposition en France : RE 2020). Il présente les résultats obtenus à partir de la méthodologie d'optimisation utilisée et des simulations effectuées.

7.1.1 Reformulation des objectifs de l'étude et du contexte

L'objectif de cette étude est d'analyser les coûts optimaux pour la rénovation de bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments, transposée en France sous le nom de RE 2020. Dans un contexte où la transition énergétique et la lutte contre le changement climatique sont des enjeux majeurs du gouvernement et de tous les citoyens, la rénovation des bâtiments existants représente un défi crucial pour réduire la consommation d'énergie et les émissions de CO₂.

Les bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale sont souvent moins performants sur le plan énergétique en raison de leur conception et de leur construction antérieure aux réglementations actuelles. Par conséquent, leur rénovation est essentielle pour améliorer leur efficacité énergétique, réduire leur impact environnemental et améliorer le confort des occupants.

La réglementation française sur la performance énergétique des bâtiments impose des normes et des objectifs en matière de performance énergétique pour les bâtiments neufs et existants. Elle fixe des exigences plus strictes en matière d'efficacité énergétique pour les bâtiments neufs mais nous l'avons pris en compte pour notre cas qui est une rénovation. Cela comprend des critères tels que l'isolation thermique, les systèmes de chauffage efficaces, ainsi que l'utilisation de sources d'énergie renouvelable.

Cependant, la rénovation des bâtiments existants peut entraîner des coûts significatifs, ce qui constitue souvent un obstacle majeur pour les propriétaires et les décideurs. Il est donc essentiel d'identifier les solutions de rénovation optimales qui permettent d'atteindre les objectifs de la RE 2020 tout en minimisant les coûts et en maximisant les effets des solutions choisies.

Dans cette étude, nous avons entrepris une analyse approfondie en utilisant une méthodologie d'optimisation basée sur la simulation. Nous avons exploré différentes combinaisons de solutions d'économie d'énergie et de systèmes d'approvisionnement en énergie, en mettant l'accent sur l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, telles que les panneaux photovoltaïques.

7.1.2 Reformulation des hypothèses

Dans le cadre de cette étude, nous avons formulé plusieurs hypothèses pour guider notre recherche.

Les systèmes de chauffage considérés dans l'optimisation sont tous de haute efficacité énergétique, ce qui signifie qu'ils produisent une chaleur maximale tout en minimisant la consommation d'énergie. De plus, ces systèmes sont considérés sans perte de performance tout au long de l'étude.

Les panneaux photovoltaïques utilisés dans l'optimisation ont une performance constante et fiable, générant de l'électricité à un taux prédéfini en fonction de leur surface.

Les différents types d'isolant utilisés dans l'optimisation ont des performances thermiques cohérentes et suivent les normes de qualité en vigueur. Leur conductivité thermique est considérée comme constante et prévisible.

Le bâtiment est considéré comme homogène, c'est-à-dire que toutes les parties de l'enveloppe (toiture, murs extérieurs) sont traitées de la même manière en termes d'isolant et d'épaisseur. Les variations de ces paramètres sont appliquées de manière cohérente sur toute la surface de l'enveloppe. Les ponts thermiques spécifiques comme un balcon ou une dalle connectée à l'enveloppe extérieur ne sont pas pris en compte dans cette étude.

Les conditions d'utilisation du bâtiment, telles que la température intérieure de consigne, le taux d'occupation et les habitudes de chauffage, sont considérées comme fixées par rapport à la programmation que nous avons mis en place tout au long de l'étude d'optimisation.

Tous les matériaux d'isolation, les systèmes de chauffage et les panneaux photovoltaïques considérés dans l'étude sont disponibles sur le marché et peuvent être installés conformément aux normes et réglementations en vigueur.

Les coûts des différents matériaux d'isolation, des systèmes de chauffage et des panneaux photovoltaïques sont considérés comme constants et prévisibles. Nous ne tenons pas compte des coûts relatifs à la maintenance de ces éléments.

Les équipements de chauffage, tels que les chaudières ou les pompes à chaleur, ainsi que les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie préétablie. Nous supposons que cette durée de vie est constante pour tous les scénarios étudiés.

Le comportement des occupants en termes de réglage de la température intérieure, d'utilisation des équipements et de gestion de l'énergie est considéré comme constant, uniforme et ne variera seulement en fonction de la programmation définie dans toutes les configurations étudiées.

Les données météorologiques nécessaires pour les simulations (température extérieure, rayonnement solaire, etc.) représentent de manière fiable les conditions climatiques du lieu où se situe le bâtiment.

Le bâtiment est considéré comme étant en bon état structurel et ne présente pas de défauts de construction significatifs pouvant affecter les performances thermiques.

La ventilation et le refroidissement n'ont pas été pris en compte dans cette étude, c'est pour cela qu'un taux d'infiltration a été fixé et gardé tout au long des optimisations.

Les différents paramètres étudiés (type et épaisseur de l'isolant, système de chauffage, surface des panneaux photovoltaïques) sont considérés comme indépendants les uns des autres, ce qui signifie que les variations de l'un n'affectent pas directement les autres.

Les performances énergétiques du bâtiment, telles que la consommation d'énergie nette et les émissions de CO₂ opératives, sont supposées varier de manière linéaire en fonction des paramètres étudiés.

Nous pouvons donc en conclure qu'un certain nombre d'hypothèses, comme les systèmes de ventilation, le contexte, le bâtiment en lui-même et bien d'autres, ont dû être réalisés pour notre étude. Cela nous a permis d'étudier avec précision certains éléments tout en fixant d'autres points.

7.1.3 Réponses aux questions de recherche

Quelles sont les solutions de rénovation d'un bâtiment en France de l'après-Deuxième Guerre mondiale, conformément à la RE 2020 et avec des coûts optimaux ?

À partir des résultats de l'optimisation réalisée, nous avons identifié une solution de rénovation qui répond aux critères de la RE 2020 tout en minimisant les coûts. Cette solution comprend des mesures d'isolation de l'enveloppe du bâtiment, un système de chauffage, ainsi que l'intégration de panneaux photovoltaïques.

Quelles sont les différents composants de rénovation ?

Nous avons étudié différentes variations du type d'isolant utilisé pour la toiture et les murs extérieurs du bâtiment. Cela implique l'évaluation des performances thermiques et des coûts associés à chaque type d'isolant.

Nous avons également pris en compte l'épaisseur de l'isolant pour la toiture et les murs extérieurs. Cela nous permet d'évaluer l'impact de l'épaisseur de l'isolant sur l'efficacité énergétique du bâtiment et les coûts de rénovation.

Nous avons inclus différentes variations de systèmes de chauffage dans nos optimisations. Cela peut inclure des options telles que les chaudières, les pompes à chaleur, etc. Notre objectif est de déterminer le système de chauffage le plus efficace en termes de performances énergétiques et de coûts.

Nous avons également étudié l'impact de différentes surfaces de panneaux photovoltaïques installés sur le bâtiment. Cela nous permet d'évaluer la production d'énergie solaire et son intégration dans le système énergétique du bâtiment.

En optimisant ces composants de rénovation, nous pouvons déterminer les combinaisons les plus favorables en termes de coût du bâtiment, de consommation d'énergie nette et d'émission de CO₂ opérative. Cela nous permettra d'identifier les solutions de rénovation qui offrent le meilleur compromis entre performances énergétiques, rentabilité économique et impact environnemental.

Quelle est la meilleure stratégie de rénovation en prenant en compte seulement l'énergie et le coût ?

Quelle est la meilleure stratégie de rénovation en prenant en compte seulement le CO₂ et le coût ?

Il n'existe pas qu'une seule stratégie optimale de rénovation, que ça soit en prenant compte l'énergie et le coût ou le CO₂ et le coût. Cela dépend énormément des conditions financières, des choix voulus pour le futur ou les objectifs des propriétaires ou des décideurs. Un grand nombre de solutions sont optimales et font parties des solutions qu'on a pu observer précédemment sur les Figure 6-3 et Figure 6-4 mais aussi sur le Tableau 6-10 et Tableau 6-11.

Ce chapitre a présenté les résultats de l'analyse des coûts optimaux pour la rénovation de bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020 en France. Les solutions de rénovation identifiées répondent aux critères de la RE 2020 tout en minimisant les coûts. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour les décideurs et les professionnels du secteur du bâtiment afin de planifier et de mettre en œuvre des stratégies de rénovation efficaces ainsi qu'économiquement viables.

Il est important de noter que les résultats et les conclusions présentés dans ce chapitre reposent sur les informations disponibles et sur les hypothèses formulées dans le cadre de cette étude. Des recherches supplémentaires et des données actualisées pourraient contribuer à affiner et à valider ces résultats à l'avenir.

7.2 Conclusions et recommandations

Cette section présente les principales découvertes et recommandations découlant des résultats de cette étude. Les recommandations sont formulées en tenant compte des implications pratiques et des implications politiques pour la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020.

7.2.1 Découvertes clés

Les résultats de cette étude mettent en évidence les stratégies de rénovation énergétique les plus efficaces pour minimiser les coûts tout en maximisant les économies d'énergie. Il a été constaté que l'adoption de mesures d'efficacité énergétique telles que l'isolation thermique, le remplacement des systèmes de chauffage obsolètes par des solutions plus performantes, et l'installation de panneaux photovoltaïques peut conduire à des économies significatives à long terme. Il est recommandé que les praticiens et les décideurs politiques intègrent ces mesures dans leurs projets de rénovation pour atteindre un équilibre optimal entre les coûts initiaux et les économies futures. Après avoir réalisé cette étude, tout en prenant en compte les différentes hypothèses énumérées et détaillées dans les chapitres précédents, nous pouvons maintenant en déduire certains points intéressants. Ce sont des observations qui ont pu se faire à partir des résultats obtenus dans le chapitre six.

Nous avons fait le choix de parcourir cette étude de deux manières différentes avec deux optimisations distinctes. D'une part, en faisant une optimisation par partie, c'est-à-dire en commençant par optimiser chaque catégorie de variables que nous avons définies, puis en sélectionnant les variables qui en ressortent pour ensuite les faire travailler ensemble. D'une autre part, nous avons réalisé une optimisation globale permettant de prendre en compte toutes les variables au même niveau, aucune présélection n'a été réalisé dans ce schéma de fonctionnement. La réalisation de ces deux méthodes d'optimisation, nous montre que nous n'obtenions pas exactement les mêmes résultats sur certain point.

Si nous nous intéressons plus précisément aux résultats obtenus, nous avons pu voir que dans chaque Figure, nous retrouvions certain groupe, qui sont le résultat des différents systèmes de panneaux photovoltaïques mis en place. Ceci montre que les panneaux photovoltaïques ont une grande importance dans le choix car ils ont un impact considérable que ça soit sur l'émission de CO₂, la consommation d'énergie nette du bâtiment ou même le coût de la rénovation.

D'autres systèmes, dans cette étude, ont été étudié dont la rénovation du système de chauffage. Après l'observation des résultats obtenus, le système de chauffage a

aussi un impact important sur les résultats, seulement dans notre cas d'étude, seulement certaines solutions ressortent dans l'optimisation. Une grande partie des combinaisons résultantes de notre étude contiennent comme solution de chauffage les radiateurs électriques, qui sont une solution très présente actuellement en France. Ce système est peu coûteux mais plus énergivore et plus émettrice de CO₂. Ici on utilise l'électricité pour se chauffer, or l'électricité en France est principalement produite par réaction nucléaire, ce qui en fait une énergie très peu émettrice de CO₂ contrairement à d'autres pays qui eux produisent leur électricité à partir de charbon ou d'autres solutions de source fossile.

Les autres systèmes de chauffage, qui ressortent de notre optimisation, sont les différentes Pompe à Chaleur (PAC). Ce sont des solutions qui utilisent des unités extérieures ou dans le sol pour permettre de récupérer les calories de ces milieux et de les utiliser pour le chauffage du bâtiment. Ainsi ce n'est pas seulement l'utilisation d'une source d'énergie tel que l'électricité qui est utilisé. On utilise donc moins d'énergie dans ce cas et donc on émet aussi moins de CO₂. Cependant l'utilisation de matériel et de système, aussi complexe que pratique, a un coût, qui est assez conséquent par rapport à celui des radiateurs électriques.

Finalement la dernière catégorie de variable dont nous n'avons pas encore discuté est celle de l'enveloppe. D'après nos résultats obtenus dans le chapitre six, entre les différentes solutions de rénovation de l'enveloppe, et en ajoutant un nouvel isolant, il n'y a qu'une très légère différence. Ce n'est pas cette différence qui est vraiment importante dans nos résultats mais plutôt la réduction de la consommation d'énergie et de la réduction de l'émission de CO₂. Si aucune amélioration n'avait été constaté sur le bâtiment au niveau de l'isolation que ce soit de la toiture ou des murs extérieurs, nous nous serions retrouvés avec des résultats beaucoup moins probant que ce nous avons obtenu.

La combinaison de ces trois catégories nous a permis d'obtenir un large panel de solutions optimales. Nous pouvons nous intéresser à une solution avec les valeurs les plus hautes mais également les plus basses, c'est-à-dire celle qui est la moins cher mais la plus énergivore ou émettrice de CO₂. Cela reste tout de même une solution optimale pour la rénovation de notre bâtiment. Cependant les conditions ne sont pas les mêmes, cela conviendra plus à des propriétaires aillant une enveloppe financière moins conséquente par rapport à toutes les autres solutions. Cela leur permet d'obtenir l'isolant, le système de chauffage et le système de panneaux photovoltaïques énumérés sur le Tableau 7-1.

Tableau 7-1 : Récapitulatif de la solution optimale la moins couteuse

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO₂ (eq kg)	Energie nette (kWh)
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337043	6952	11 730

Dans la même continuité que notre précédente observation, nous pouvons prendre la solution la plus couteuse et s'y intéresser. Ici cette combinaison correspondra à des personnes aillant un portefeuille plus important et pouvant déboursier une certaine somme directement à la rénovation. Cependant cela leur permettra de réduire leur consommation d'énergie mais aussi leur émission de CO₂. Ils réduiront donc leur facture énergétique de façon plus drastique que la précédente solution. Ici, nous n'avons pas obtenu la même solution entre l'optimisation de CO₂ et celle de l'énergie, c'est pour cela que nous obtenons un couple de solution, où la seul différent est au niveau des murs extérieurs. De plus, ce sont les seules solutions qui permettent d'être en dessous des deux seuils de la RE 2020. Ils respectent donc notre hypothèse de vouloir mener la rénovation vers des réglementations qui se rapprochent de celles des bâtiments neufs. Pour respecter cela, ils devront donc installer de l'isolant, le système de chauffage et le système de panneaux photovoltaïques, qui sont énumérés sur le Tableau 7-2.

Tableau 7-2 : Récapitulatif de la solution optimale la plus couteuse

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)	Energie nette (kWh)
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	426502	641	X
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	429 201	X	1 278

Pour terminer, nous pouvons donc voir que nous nous retrouvons seulement avec une seule combinaison respectant les deux seuils qui était fixé par la RE 2020. Il est très important de revenir sur le fait que nous avons fait le choix de se projeter et d'imaginer que dans un futur proche des seuils pour la consommation de l'énergie et l'émission de CO₂ d'un bâtiment à rénover seront appliqués. Nous nous sommes placés ici dans le cas où nous prenions les seuils actuels de la RE 2020. Nous les avons ensuite appliqué à une rénovation. Ces seuils de la RE 2020 pour les bâtiments neufs seront bien évidemment beaucoup plus stricts dans le futur. Ainsi se placer dans le cas de bâtiment existants, avec les seuils actuels de la RE 2020, semble cohérent.

L'étude a révélé que les mesures de rénovation énergétique préconisées dans cette recherche peuvent avoir un impact significatif sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre et sur la diminution de l'empreinte carbone des bâtiments. Par conséquent, il est essentiel de promouvoir activement ces pratiques pour atteindre les objectifs de durabilité et de lutte contre le changement climatique. Les recommandations incluent des aides financières et des politiques favorables à la rénovation énergétique, ainsi que des campagnes de sensibilisation pour encourager les propriétaires de bâtiments à entreprendre ces actions.

7.2.2 Recommandations

Sur la base des résultats de cette étude, il est recommandé aux décideurs politiques d'adopter des réglementations favorables à la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale. Cela peut inclure des incitations financières telles que des subventions ou des crédits d'impôt pour encourager les propriétaires à entreprendre des travaux de rénovation énergétique. De plus, l'élaboration de normes de performance énergétique plus strictes pour les bâtiments existants peuvent inciter à l'adoption de mesures énergétiques.

Une recommandation clé consiste à augmenter la sensibilisation, l'éducation des propriétaires de bâtiments, des acteurs du secteur de la construction sur les avantages et les opportunités liés à la rénovation énergétique. Cela peut être réalisé par le biais de campagnes de sensibilisation, de formations professionnelles et de ressources éducatives. En informant les parties prenantes des économies potentielles, des avantages environnementaux et des aides disponibles, il est plus probable que les propriétaires de bâtiments considèrent la rénovation énergétique comme une option viable.

Il est recommandé d'encourager la collaboration entre les différents acteurs du secteur de la construction, tels que les architectes, les ingénieurs, les entrepreneurs et les fournisseurs de matériaux. Une coordination efficace entre ces parties prenantes peut faciliter la mise en œuvre de projets de rénovation énergétique, en garantissant une planification cohérente, des synergies techniques et des économies d'échelle.

En conclusion, les résultats de cette étude mettent en évidence les mesures de rénovation énergétique les plus efficaces pour les bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale. Les recommandations formulées ici visent à orienter les décideurs politiques, les praticiens et les parties prenantes vers des actions concrètes pour promouvoir la rénovation énergétique, réduire les coûts, minimiser l'empreinte carbone et améliorer la durabilité du parc immobilier existant. Il est essentiel de mettre en œuvre ces recommandations afin de créer un environnement bâti plus efficace sur le plan énergétique et plus respectueux de l'environnement.

7.3 **Forces et limites de l'étude**

7.3.1 Points forts de l'étude

Cette section vise à mettre en évidence les points forts et la valeur ajoutée de cette étude, ainsi que son adéquation, sa validité et son importance par rapport au corpus existant de connaissances et au cadre théorique établi précédemment.

Cette étude apporte une contribution significative à la littérature existante sur la rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020. Elle élargit la compréhension des coûts optimaux de rénovation en intégrant des variables clés, telles que l'efficacité énergétique, la durabilité et les performances techniques. En comblant cette lacune de recherche, cette étude offre des informations précieuses aux praticiens, aux décideurs politiques et aux chercheurs intéressés par la rénovation énergétique des bâtiments existants.

Une force majeure de cette étude réside dans l'utilisation d'une méthodologie rigoureuse et double. Les modèles économiques et les simulations numériques ont été construits avec soin en utilisant des données fiables et en appliquant des techniques statistiques avancées. Cela renforce la validité des résultats obtenus et permet de tirer des conclusions robustes. Nous avons aussi utilisé ce modèle dans un contexte réaliste et avec des données météorologiques réalistes.

L'étude s'inscrit dans un contexte pratique, en fournissant des informations directement applicables à la rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale. Les résultats de cette recherche peuvent être utilisés pour guider les décisions de rénovation, informer les politiques publiques et sensibiliser les acteurs concernés. En mettant l'accent sur l'optimisation des coûts et la maximisation de l'efficacité énergétique, cette étude offre des solutions concrètes pour améliorer la performance des bâtiments existants.

7.3.2 Limitations et faiblesses de l'étude

Il est également important de reconnaître les limitations et les faiblesses de cette étude. Cela permet d'adopter une approche critique et de mettre en perspective les résultats obtenus, sans pour autant démolir le travail effectué. Voici quelques limitations identifiées.

Les résultats de cette étude sont basés sur des données et des paramètres spécifiques utilisés dans le modèle. Il est essentiel de reconnaître que ces résultats peuvent varier en fonction du contexte géographique, des caractéristiques spécifiques des bâtiments et des politiques locales. Par conséquent, il est recommandé de considérer ces résultats comme des indications générales et de les adapter en fonction des circonstances spécifiques de chaque projet de rénovation.

La disponibilité de données précises et complètes peut représenter un défi dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments. Bien que cette étude se soit appuyée sur des données fiables, il est possible que certaines variables aient été approximées ou estimées. Cela peut influencer les résultats et introduire une certaine marge d'erreur (Hamdy, Sirén & Attia, 2017). Cela est dû à l'influence majeure des derniers événements mondiaux venant faire fluctuer grandement les prix des matériaux.

De plus, dans notre étude seulement l'émission de CO₂ et la consommation d'énergie du bâtiment après la rénovation sont pris en compte, aucune phase que ça soit, pour la fabrication des matériaux, le transport mais aussi l'installation n'a été prise en compte. Il serait donc intéressant de poursuivre une seconde étude en complément de celle-ci pour venir croiser les données obtenues.

Les modèles économiques utilisés dans cette étude sont basés sur des hypothèses et des simplifications nécessaires pour leur application. Ces simplifications peuvent ne pas capturer toutes les nuances et les interactions complexes du système réel. Par conséquent, les résultats économiques obtenus doivent être interprétés avec prudence.

Concernant les solutions précédemment obtenus, certaines limitations apparaissent rapidement lorsque l'on se trouve dans la rénovation et sur des bâtiments où l'on souhaite ou on est obligé de garder la façade extérieure intacte, l'isolation par intérieur a certaines inconvénients. Ces inconvénients ne sont pas forcément totalement intégrés dans notre étude, comme l'espace pris par des solutions d'isolation par l'intérieur avec un isolant faisant environ 24 cm, réduisant énormément l'espace de vie intérieur. Mais aussi par exemple tous les ponts thermiques encore présents après travaux.

En conclusion, cette étude présente plusieurs points forts, notamment sa contribution à la littérature existante, sa méthodologie rigoureuse et sa pertinence pratique. Cependant, il est important de reconnaître les limitations et les faiblesses inhérentes à cette recherche. Ces limitations soulignent la nécessité de poursuivre les travaux futurs pour améliorer les modèles, élargir la portée de l'analyse et affiner les résultats obtenus. En adoptant une approche objective et critique, il est possible d'obtenir une meilleure compréhension de la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale et d'orienter les décisions futures dans ce domaine.

7.4 Implications dans la pratique et dans des travaux futurs

Les résultats de cette étude ont des implications importantes pour la pratique de la rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020. Les principales conclusions et recommandations peuvent être utilisées par les professionnels du secteur de la construction, les décideurs politiques et les organismes de réglementation pour guider leurs actions et leurs politiques. Voici quelques implications pratiques importantes de cette recherche.

7.4.1 Informar les décisions de rénovation

Les résultats de cette étude fournissent des informations précieuses sur les coûts optimaux de rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale. Les professionnels du secteur de la construction peuvent utiliser ces informations pour évaluer les options de rénovation, estimer les coûts associés et prendre des décisions éclairées sur les projets de rénovation. Cela peut contribuer à l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments existants tout en optimisant les investissements financiers.

7.4.2 Guider les politiques de rénovation

Les décideurs politiques et les organismes de réglementation peuvent utiliser les résultats de cette recherche pour orienter le développement de politiques de rénovation énergétique plus efficaces. Les recommandations fournies, telles que l'identification des stratégies de rénovation les plus rentables et les incitations financières appropriées, peuvent servir de base pour l'élaboration de programmes et de mesures incitatives visant à encourager la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale. Cela contribuerait à la réalisation des objectifs de durabilité énergétique à long terme.

7.4.3 Sensibilisation et formation

Les résultats de cette étude peuvent également être utilisés pour sensibiliser les propriétaires de bâtiments et les occupants sur les avantages de la rénovation énergétique. Certaines personnes ne voient pas le potentiel d'une rénovation pour leur futur et pour leur facture d'énergie. La communication des résultats clés, tels que les économies potentielles de coûts et les améliorations du confort, peut encourager l'adoption de mesures de rénovation. De plus, ces résultats peuvent servir de base pour le développement de programmes de formation visant à renforcer les compétences des professionnels de la construction dans le domaine de la rénovation énergétique.

Pour rendre cette étude complète et concluante, il est nécessaire de poursuivre les travaux futurs en explorant certaines questions et étapes clés.

7.4.4 Validation des modèles et des résultats

Il est important de valider les modèles utilisés dans cette étude en les comparant à des données réelles de projets de rénovation. Cela permettrait de vérifier la précision des résultats obtenus et de confirmer leur applicabilité pratique. La collecte de données supplémentaires sur des projets de rénovation existants et la comparaison des coûts réels avec les estimations de cette étude contribueraient à

renforcer la fiabilité des résultats. Une validation avec un nouveau modèle constitué à partir de données cette région augmenterait le réalisme des résultats.

7.4.5 Intégration de considérations temporaires

Cette étude s'est principalement concentrée sur les coûts de rénovation à court terme. Les travaux futurs pourraient explorer l'impact des considérations temporaires, tels que les coûts de maintenance à long terme, sur les décisions de rénovation. En tenant compte de ces aspects temporels, il serait possible d'évaluer plus précisément les avantages économiques à long terme des stratégies de rénovation proposées.

7.4.6 Analyse des aspects environnementaux et sociaux

Bien que cette étude se soit principalement concentrée sur les coûts de rénovation énergétique, il est important d'élargir l'analyse pour inclure les aspects environnementaux et sociaux. Les futurs travaux de recherche pourraient explorer les impacts environnementaux des différentes stratégies de rénovation et évaluer leurs contributions à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. De plus, il serait intéressant d'étudier les effets sociaux de la rénovation énergétique, tels que l'amélioration de la qualité de vie des occupants et la réduction de la précarité énergétique. Une autre étude pourrait être réalisée sur le coût énergétique de ces solutions lors de leur construction et de leur fabrication.

7.4.7 Étude de cas approfondie

Pour mieux comprendre les défis et les opportunités spécifiques liés à la rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale, des études de cas approfondies pourraient être réalisées. Cela impliquerait d'analyser des projets de rénovation réels, d'identifier de nouveaux indicateurs et les difficultés rencontrées, et de formuler des recommandations plus spécifiques adaptées à chaque contexte.

En conclusion, cette étude offre des implications pratiques importantes pour la rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la directive RE 2020. Cependant, pour compléter et approfondir cette recherche, il est essentiel de continuer les travaux futurs en validant les modèles, en intégrant des considérations temporelles, en analysant les aspects environnementaux et sociaux, et en réalisant des études de cas approfondies. Ces travaux futurs contribueront à renforcer la crédibilité et l'applicabilité des résultats de cette étude, et favoriseront une meilleure prise de décision dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale.

8 Conclusions

8.1 Conclusions générales

Dans cette étude, nous avons examiné en détail la rénovation d'un bâtiment de l'après-seconde guerre mondiale situé près de Nantes, en appliquant les principes et les attentes de la réglementation RE 2020 aux bâtiments existants. Notre objectif était d'optimiser l'enveloppe du bâtiment, les systèmes de chauffage et l'installation de panneaux photovoltaïques afin de minimiser d'un côté le coût du bâtiment et d'un autre la consommation d'énergie nette ou les émissions de CO₂ opératives.

Grâce à l'utilisation du logiciel Design Builder, nous avons pu réaliser des simulations détaillées en variant différents paramètres que nous avons définis, tels que le type et l'épaisseur de l'isolant, les systèmes de chauffage et la surface des panneaux photovoltaïques. Nous avons pris en compte des hypothèses soigneusement définies pour assurer la fiabilité de nos résultats dès le début de notre étude.

Les principales découvertes de notre étude montrent que l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, en utilisant des isolants de haute performance, permet de réduire significativement la consommation d'énergie et les émissions de CO₂. De plus, l'utilisation de systèmes de chauffage de haute efficacité énergétique ainsi que l'installation de panneaux photovoltaïques sur la toiture de notre bâtiment peuvent contribuer à une diminution supplémentaire de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, tout en générant de l'électricité utilisable sur site ou injectable dans le réseau.

Cette étude a apporté une contribution significative à la compréhension de la rénovation des bâtiments existants selon les normes de la RE 2020. Les résultats obtenus montrent clairement les avantages économiques et environnementaux d'une rénovation énergétique efficace. Ils fournissent également des informations précieuses pour les décideurs politiques, les professionnels du bâtiment et les propriétaires qui cherchent à rénover leurs bâtiments de manière durable et qui leur permettront de sélectionner certaines combinaisons de solutions plus efficaces que d'autres.

En conclusion, notre recherche a répondu aux questions de recherche posées, et nous avons pu démontrer comment l'étude a contribué à l'ensemble des connaissances existantes en matière de rénovation énergétique des bâtiments. Sur la base de nos résultats, nous formulons des recommandations claires pour améliorer les performances énergétiques des bâtiments existants en appliquant des mesures spécifiques d'optimisation de l'enveloppe, des systèmes de chauffage et de l'utilisation de l'énergie solaire.

Il est important de noter que cette étude comporte certaines limites. Les hypothèses faites dans le cadre de nos simulations peuvent ne pas représenter toutes les conditions réelles. De plus, les coûts associés à la rénovation et à l'entretien des bâtiments ainsi que les comportements des occupants peuvent influencer les résultats de manière significative. Ces limitations doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats et de la formulation de politiques et de pratiques de rénovation.

En conclusion, cette étude offre une perspective prometteuse pour la rénovation énergétique des bâtiments existants en mettant en évidence les avantages économiques et environnementaux d'une approche intégrée. Elle souligne également l'importance de politiques et de mesures incitatives pour encourager et faciliter la rénovation énergétique à grande échelle, que ça soit pour des bâtiment résidentiel, comme dans notre étude, ou que ça soit pour des bâtiment pour le tertiaire. L'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes de chauffage et l'intégration de l'énergie solaire peuvent contribuer de manière significative à la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ dans le secteur du bâtiment, mais cela doit être bien sûr pris en considération que ces investissements ont un coût, et il dépendra effectivement des solutions choisies.

8.2 Suggestions pour des recherches ultérieures

Les recherches présentées dans cette étude ont permis de fournir des observations importantes sur les coûts optimaux de rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020. Cependant, il reste encore plusieurs questions et défis à explorer dans ce domaine et sur ce type de bâtiment. Ce chapitre propose quelques suggestions pour des recherches ultérieures afin de développer davantage le sujet étudié et de combler les lacunes identifiées.

8.2.1 Évaluation de l'impact des incertitudes

Les coûts de rénovation des bâtiments sont souvent soumis à des incertitudes liées à la fluctuation des prix des matériaux, à l'évolution des technologies et aux variations des politiques publiques. Une recherche future pourrait se concentrer sur l'évaluation de l'impact de ces incertitudes sur les coûts optimaux de rénovation. Cela pourrait inclure l'utilisation de techniques d'analyse de sensibilité pour identifier les facteurs qui influencent le plus les résultats et l'élaboration de stratégies d'adaptation aux incertitudes. Il serait donc intéressant de réaliser une étude complémentaire comportant une analyse de sensibilité mais aussi une analyse d'incertitude (Mahar, Verbeeck, Reiter & Attia, 2020).

8.2.2 Intégration de considérations économiques et sociales

Bien que cette étude se soit principalement concentrée sur les aspects techniques et financiers de la rénovation des bâtiments, il est essentiel d'intégrer des considérations économiques et sociales pour une vision complète. Des recherches ultérieures pourraient explorer les aspects socio-économiques de la rénovation, tels que les impacts sur l'emploi local, la santé des occupants, la qualité de vie, et la réduction des inégalités énergétiques. Cela pourrait aider à élaborer des stratégies de rénovation plus inclusives et bénéfiques pour l'ensemble de la société.

8.2.3 Approfondissement de l'analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil puissant pour évaluer l'impact environnemental global des bâtiments et des systèmes de rénovation. Des recherches ultérieures pourraient se concentrer sur une analyse du cycle de vie plus détaillée en prenant en compte les différentes phases du cycle de vie, y compris l'extraction des matériaux, la production, l'utilisation et l'élimination. Cela permettrait d'obtenir une compréhension plus approfondie des implications environnementales des différentes options de rénovation et d'identifier les domaines où des améliorations significatives peuvent être apportées.

8.2.4 Analyse des obstacles et des incitations

La rénovation des bâtiments est un processus complexe qui peut être entravé par divers obstacles, tels que des réglementations inadéquates, des contraintes financières et des barrières techniques. Une recherche future pourrait se pencher sur l'analyse des obstacles spécifiques à la rénovation des bâtiments de l'après-Deuxième Guerre mondiale et proposer des solutions pour les surmonter. De plus, il est important d'examiner les incitations financières et les politiques publiques qui pourraient encourager davantage la rénovation énergétique, telles que les subventions, les incitations fiscales et les programmes de sensibilisation.

8.2.5 Étude des aspects architecturaux et patrimoniaux

Les bâtiments de l'après-Deuxième Guerre mondiale peuvent présenter des caractéristiques architecturales et patrimoniales uniques qui nécessitent une attention particulière lors de la rénovation. Une recherche future pourrait se concentrer sur l'étude des aspects architecturaux et patrimoniaux de ces bâtiments, en proposant des stratégies de rénovation qui préservent leur valeur culturelle tout en améliorant leur performance énergétique, tout en respectant ces différentes contraintes. Cela impliquerait une collaboration étroite entre les experts en rénovation énergétique et les professionnels du patrimoine.

En conclusion, cette étude a ouvert la voie à de nouvelles perspectives sur les coûts optimaux de rénovation des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020, qui était initialement rédigée pour les bâtiments neufs. Cependant, il reste encore beaucoup à explorer dans ce domaine. Les suggestions de recherche présentées ici offrent des pistes intéressantes pour des recherches ultérieures, en mettant l'accent sur l'évaluation des incertitudes, l'intégration des considérations économiques et sociales, l'approfondissement de l'analyse du cycle de vie, l'analyse des obstacles et des incitations, ainsi que l'étude des aspects architecturaux et patrimoniaux. Ces recherches futures contribueront à une meilleure compréhension et à une mise en œuvre plus efficace de la rénovation énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale, favorisant ainsi la transition vers un environnement bâti plus durable et économe en énergie.

9 Références

Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate change effects on Belgian households: a case study of a nearly zero energy building. *Energies*, 13(20), 5357.

Ruellan, G., Cools, M., & Attia, S. (2021). Analysis of the determining factors for the renovation of the Walloon residential building stock. *Sustainability*, 13(4), 2221.

Attia, S., Mustafa, A., Giry, N., Popineau, M., Cuchet, M., & Gulirmak, N. (2021). Developing two benchmark models for post-world war II residential buildings. *Energy and Buildings*, 244, 111052.

Amer, M., Hamdy, M., Wortmann, T., Mustafa, A., & Attia, S. (2020). Methodology for design decision support of cost-optimal zero-energy lightweight construction. *Energy and Buildings*, 223, 110170.

Athienitis, A., & Attia, S. (2010). Design, optimization, and modelling issues of net-zero energy solar buildings. *Eurosun 2010*.

Attia, S., Canonge, T., Popineau, M., & Cuchet, M. (2022). Developing a benchmark model for renovated, nearly zero-energy, terraced dwellings. *Applied Energy*, 306, 118128.

Hamdy, M., Sirén, K., & Attia, S. (2017). Impact of financial assumptions on the cost optimality towards nearly zero energy buildings—A case study. *Energy and Buildings*, 153, 421-438.

Mahar, W. A., Verbeeck, G., Reiter, S., & Attia, S. (2020). Sensitivity analysis of passive design strategies for residential buildings in cold semi-arid climates. *Sustainability*, 12(3), 1091.

Cost optimality - eceee. (n.d.). Retrieved November 11, 2022, from <https://www.eceee.org/policy-areas/Buildings/cost-optimality/>

Attia, S., Mustafa, A., Giry, N., Popineau, M., Cuchet, M., & Gulirmak, N. (2021, April 26). *Developing two benchmark models for post-world War II residential buildings*. *Energy and Buildings*. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821003364>

ISO, “18523-2:2016. Energy performance of buildings - Schedule and condition of building, zone and space usage for energy calculation – Part 2: Residential buildings.” International Organization for Standardization, 2016.

DOE, “EnergyPlus.” Department of Energy, 2021, Accessed: Dec. 02, 2021. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>

Vujnović, N., & Dović, D. (2021, February 14). *Cost-optimal energy performance calculations of a new NZEB hotel building using dynamic simulations and optimization algorithms*. Journal of Building Engineering. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221001285>

Panagiotidou, M., Aye, L., & Rismanchi, B. (2021, August 25). *Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets*. Energy and Buildings. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778821006691>

Karásek, J., Pojar, J., Kaločai, L., & Heralová, R. S. (2018, August 31). *Cost optimum calculation of energy efficiency measures in the Czech Republic*. Energy Policy. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421518305767>

Vasconcelos, A. B. de, Pinheiro, M. D., Manso, A., & Cabaço, A. (2015, November 12). *EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building*. Energy and Buildings. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815303704>

Candio, P., Violato, M., Luengo-Fernandez, R., & Leal, J. (2022, January 15). *Cost-effectiveness of home-based stroke rehabilitation across Europe: A modelling study*. Health Policy. Retrieved November 11, 2022, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168851022000070>

Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation (2021), from <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045288020>

RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique. (2023). Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020->

nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus

Cegibat (2023). *RE2020 : les grands principes*. Cegibat.fr. <https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/re-2020-grands-principes>

Idée maison - Guide prix isolation. (2019). <https://www.ideesmaison.com/Guide-des-prix/Guide-des-prix-de-l-isolation/Prix-de-l-isolation-interieure-au-m2/Prix-de-l-isolation-interieure-au-m2.html>

Prix-travaux-m2. (2023). *Prix d'une isolation au m2 en 2023*. <https://www.prix-travaux-m2.com/prix-isolation-thermique.php>

Zaffini, S. (2023). *Prix d'une isolation intérieure au m². Prix Pose*. <https://www.prix-pose.com/isolation-interieure/>

Travaux.com. (2023). *Prix de l'isolation des murs*. <https://www.travaux.com/isolation/guide-des-prix/prix-de-lisolation-des-murs>

Joarson. (2020). *Prix de l'isolation thermique : guide complet*. *Isolationthermique.org*. <https://isolation-thermique.org/financer-isolation-thermique/prix-isolation-thermique/prix-isolation-thermique/>

Calculeo. (2021) *Combien coûte l'isolation thermique de votre maison ?* Calculeo. <https://www.calculeo.fr/subventions/isolation-thermique/prix>

Ramier, S. (2021, November 30). *Les Matériaux D'isolation Les Plus Courants » Construction Et Travaux*. *Construction et travaux*. <https://www.construction-travaux.com/les-materiaux-disolation-les-plus-courants/>

Buldit. (2023). *Isolation toiture : Aperçu des matériaux isolants*. *Toiture-couvreur.fr*. <https://www.toiture-couvreur.fr/isolation-toiture>

Lacas, F. (2021, February 9). *Équipements de chauffage : les gagnants et les perdants de l'année 2020*. *Batiactu*. <https://www.batiactu.com/edito/genie-climatique-ventes-pac-stables-gaz-et-fioul-recul-61199.php>

Statista Research Department. (2023). *Marché des chaudières gaz et fioul en France 2013-2022*. <https://fr.statista.com/statistiques/621854/marche-chaudieres-gaz-et-fioul-livraisons-france/>

Statista Research Department. (2023). *Types de chauffage utilisés pour le logement principal en France 2018*. <https://fr.statista.com/statistiques/856283/types-chauffage-logement-principal-france/>

Maison & Travaux. (2023). Les différents chauffages : combien coûtent-ils ? *Maison & Travaux*. <https://www.maison-travaux.fr/maison-travaux/renovation-par-type/chauffage-renovation-par-type/differents-chauffages-combien-coutent-fp-183421.html#:~:text=Insert%20bois%2C%20po%3%AAle%20%20%20bois,%E2%82%AC%20%20%2015%20000%20%E2%82%AC>

Maridet, A. (2021). Prix des différents types de chauffage : tout pour bien choisir. *www.habitapresto.com*. <https://www.habitapresto.com/mag/chauffage/prix-chauffage>

Muret. (2019, October 15). *Combien Coûtent les Travaux de Chauffage? Prix, Coût, Devis. Conseils Travaux*. <https://www.quotatis.fr/conseils-travaux/elements/chauffage/estimer-le-prix-de-vos-travaux-de-chauffage/>

Izi by EDF Renov. (2023). Comparatif des principaux systèmes de chauffage. <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/comparaison-systemes-de-chauffage>

Total Énergies. (2023). Quel est le prix d'une chaudière à gaz ? Total Énergies. <https://www.totalenergies.fr/particuliers/gaz/gaz-le-guide/chaudiere-a-gaz/quel-est-le-prix-d-une-chaudiere-a-gaz#:~:text=facture%20de%20gaz%20%3F-,Le%20prix%20moyen%20d%27une%20chaudière%20à%20gaz,500%20€%20et%202500%20€>.

La prime Energie. (2023). *Combien coûte une chaudière ?*. <https://www.laprimeenergie.fr/les-travaux/la-chaudiere/prix>

Zaffini, S. (2023). Prix d'une chaudière gaz. *Prix Pose*. <https://www.prix-pose.com/chaudiere-gaz/>

Particuliers ENGIE. (2023, January 13). Prix d'une chaudière à gaz : quels critères ? *Particuliers ENGIE*. <https://particuliers.engie.fr/depannages-services/conseils-equipements-chauffage/conseils-chaudiere/chaudiere-gaz-prix.html>

Zaffini, S. (2023). Prix d'une chaudière électrique. *Prix Pose*. <https://www.prix-pose.com/chaudiere-electrique/>

La prime Energie. (2023). *Prix d'achat, frais d'installation et d'entretien : quel coût pour la chaudière électrique ?*. <https://www.laprimeenergie.fr/les-travaux/la-chaudiere/prix-de-la-chaudiere-electrique>

Gonçalves, M. (2023). *Prix des panneaux solaires : le tarif en détail*. <https://www.laprimeenergie.fr/les-travaux/le-panneau-solaire/prix>

Prix-travaux-m2 (2023). *Prix des panneaux solaires en 2023*. <https://www.prix-travaux-m2.com/prix-panneaux-solaires.php>

Engie. (2023, February 28). Le coût d'un panneau solaire. *Mypower ENGIE*. <https://mypower.engie.fr/conseils/couts-panneaux-solaires/cout-panneau-solaire.html>

Benitte, C. (2023). Architecte DPLG, Architecte d'intérieur, Professeur à l'ESAM Design

SDGS (2015). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/goals>

Europarl. (2023, 2 septembre). *Energy performance of buildings : climate neutrality by 2050 | News | European Parliament*. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230206IPR72112/energy-performance-of-buildings-climate-neutrality-by-2050>

Annexe 1 : Appareils électroménagers que l'on trouve dans les maisons unifamiliales belges typiques de l'après-Seconde Guerre mondiale

(Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet & Gulirmak, 2021)

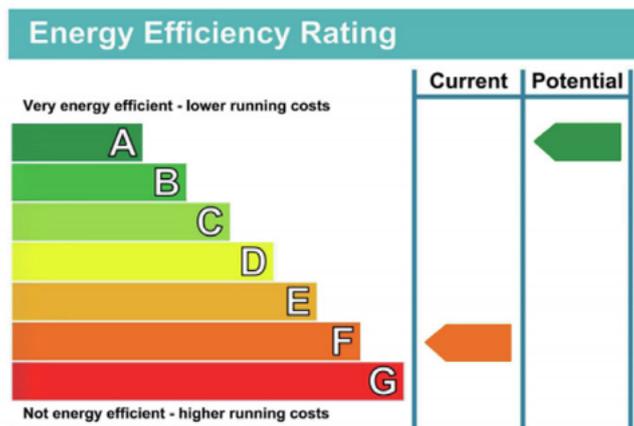
Appliance	Watt-hour	Daily Operating Hours	Appliance	Watt-hour	Daily Operating Hours
Furnace fan	50	1.5	HD Television	50	5
Coffee machine	600	0.2	Deep Fryer	1500	0.05
Microwave	1500	0.2	Washing machine	680	0.8
Mobile charger	5	24	Refrigerator (2 doors)	95	24
Phone charger	3	3	Kettle	1500	0.2
Built in Oven	300	0.1	PC/ Laptop/Tablets	150/60/40	2
Electric Iron	1100	0.1	Freezer	15	24
Vacuum cleaner	330	0.05	Radio	15	0.1
Clothes Dryer	561	0.8	Dishwasher	720	1
DVD/CD Player	40	0.05	Electric Stove	650	0.9

Annexe 2 : Intensité de la consommation d'énergie et émissions de carbone mesurées entre 2016 et 2019 pour l'archétype A à Wezembeek-Oppem, en Flandre

(Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet & Gulirmak, 2021)



Archetype A



Gas boiler

Single glazing

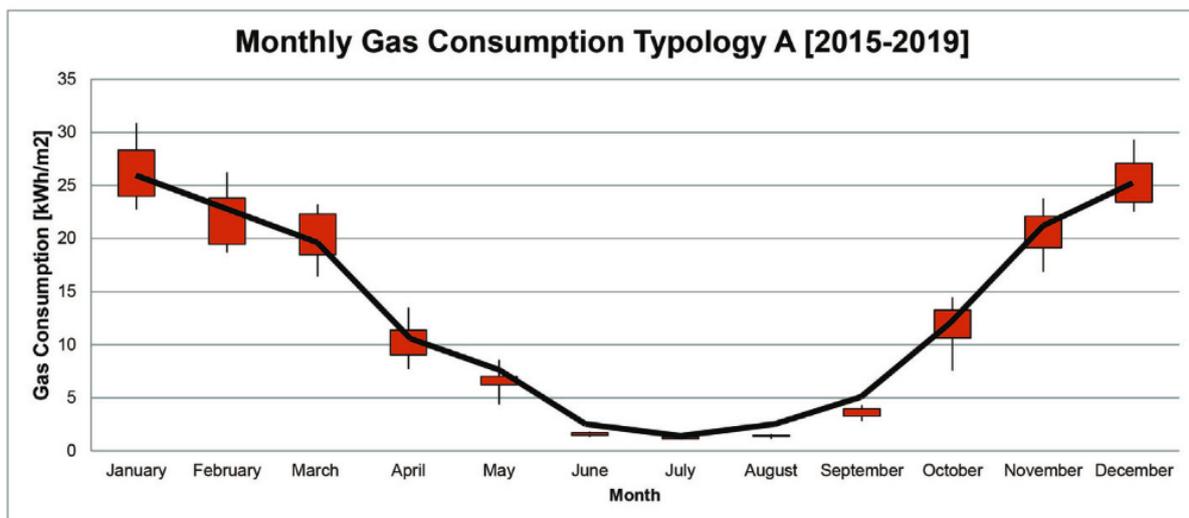
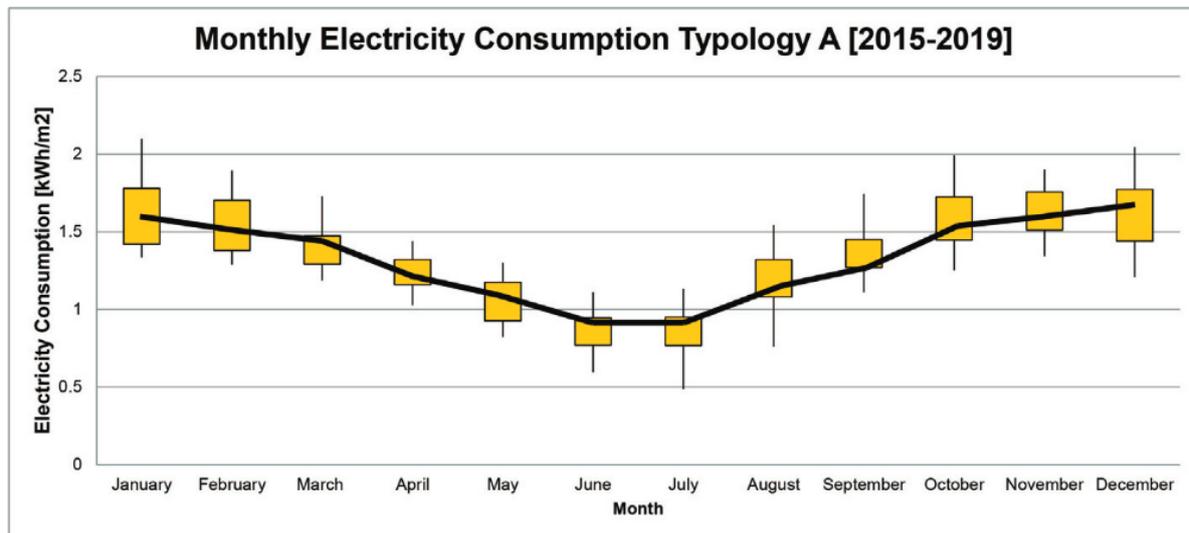
No ground/roof insulation

EUI: 166 kWh/m²/year

Carbon: 32 kg CO₂/m²/year

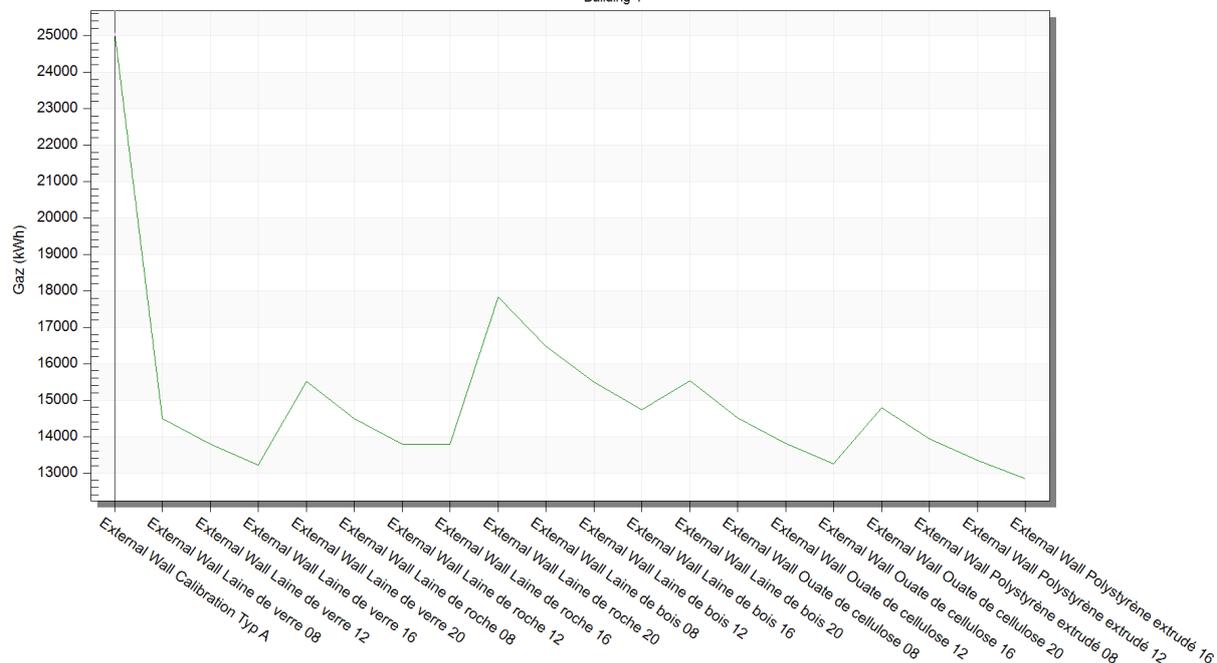
Annexe 3 : Enquête et simulation de la consommation mensuelle d'électricité et de gaz de la typologie A

(Attia, Mustafa, Giry, Popineau, Cuchet & Gulirmak, 2021)

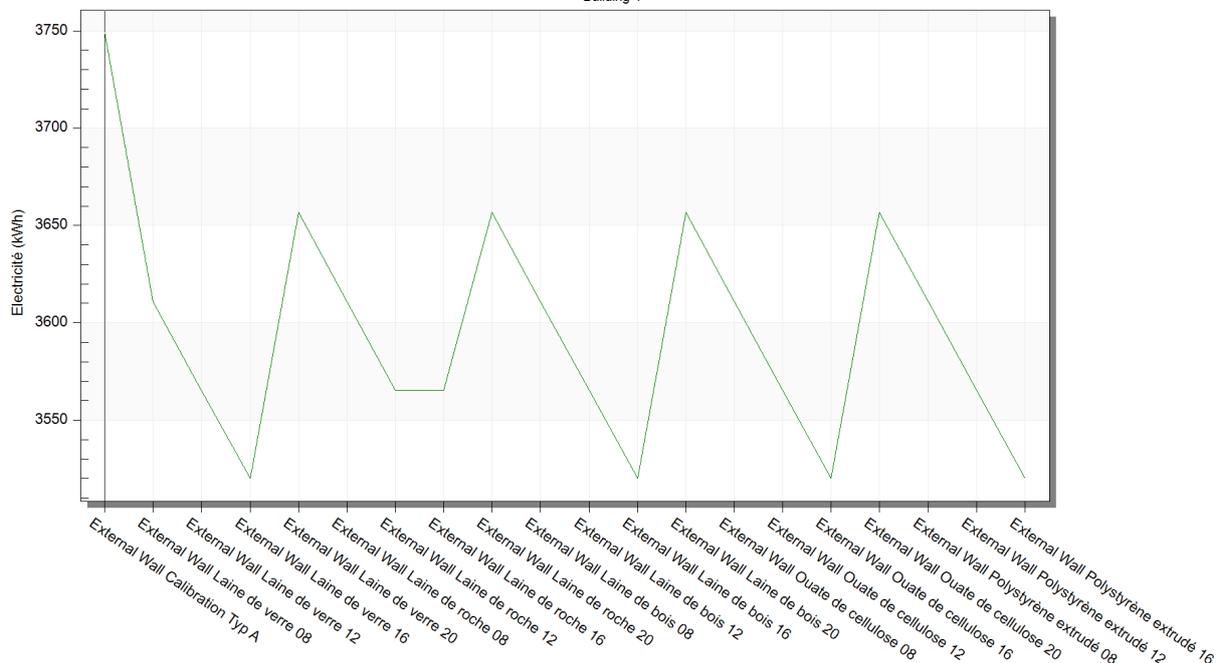


Annexe 4 : Analyse paramétrique pour l'isolation des murs extérieurs

Parametric Analysis Results - Gaz (kWh)
Building 1

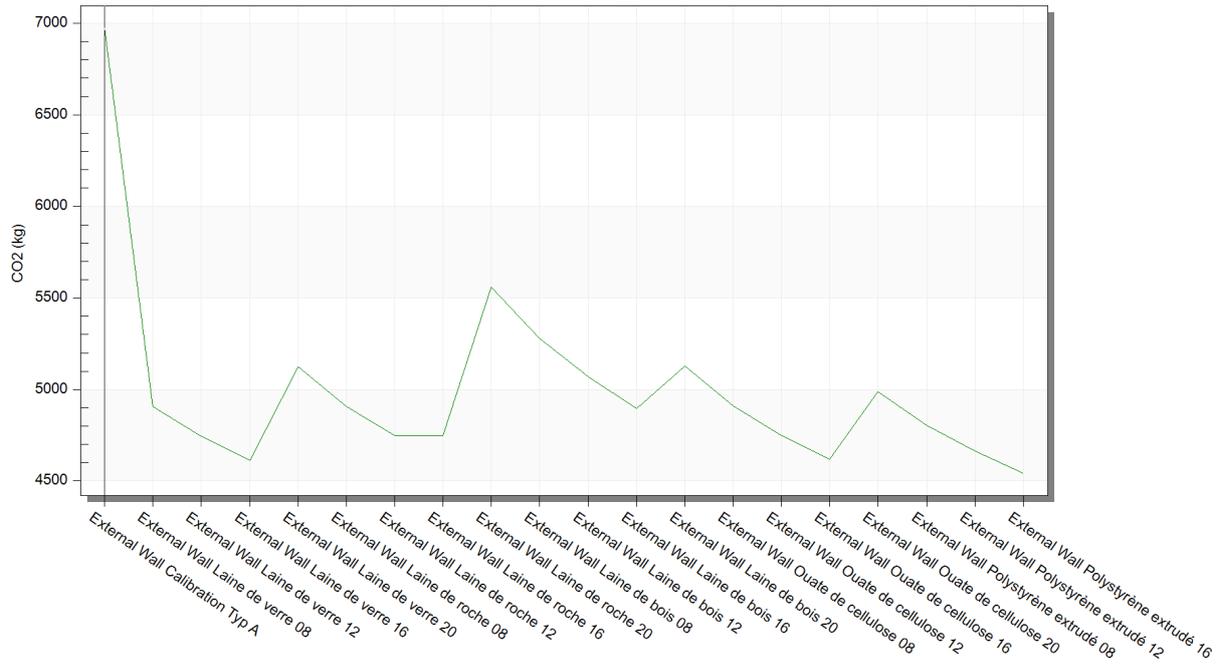


Parametric Analysis Results - Electricité (kWh)
Building 1



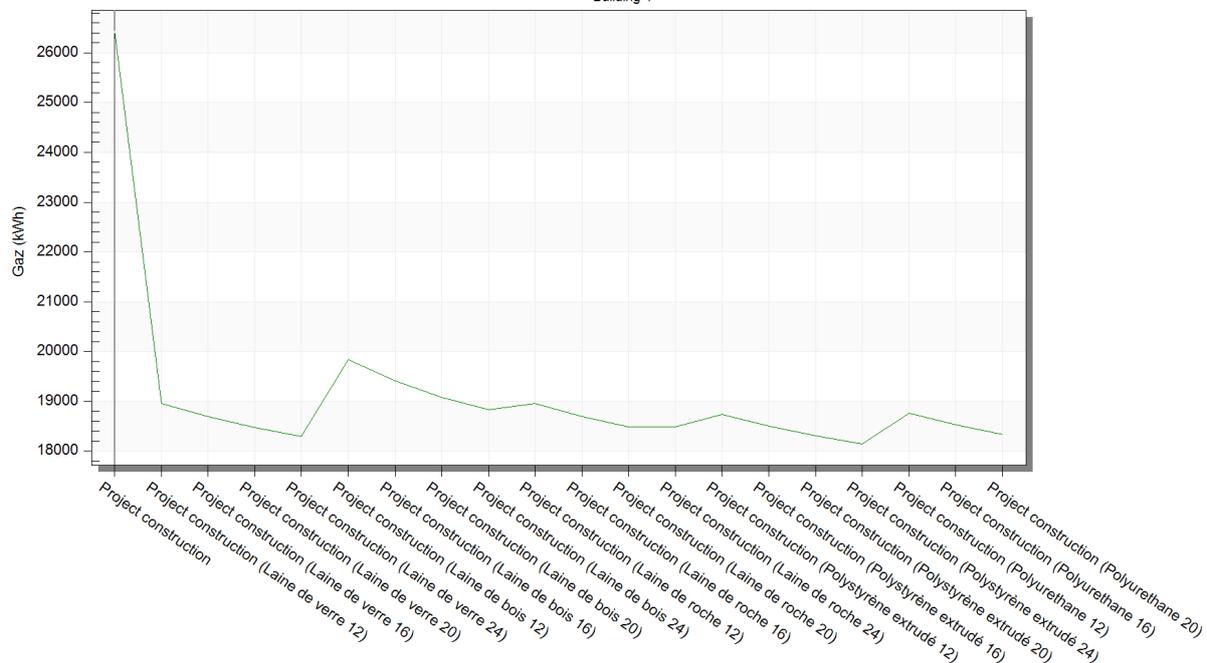
Parametric Analysis Results - CO2 (kg)

Building 1

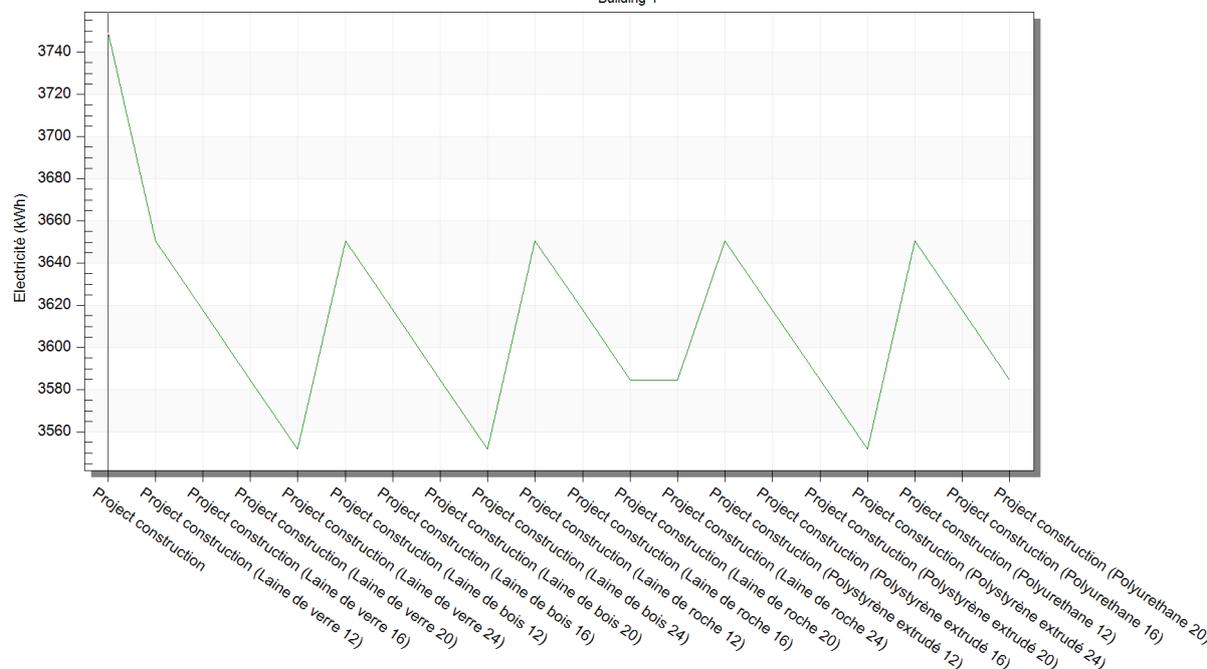


Annexe 5 : Analyse paramétrique pour l'isolation de la toiture

Parametric Analysis Results - Gaz (kWh)
Building 1

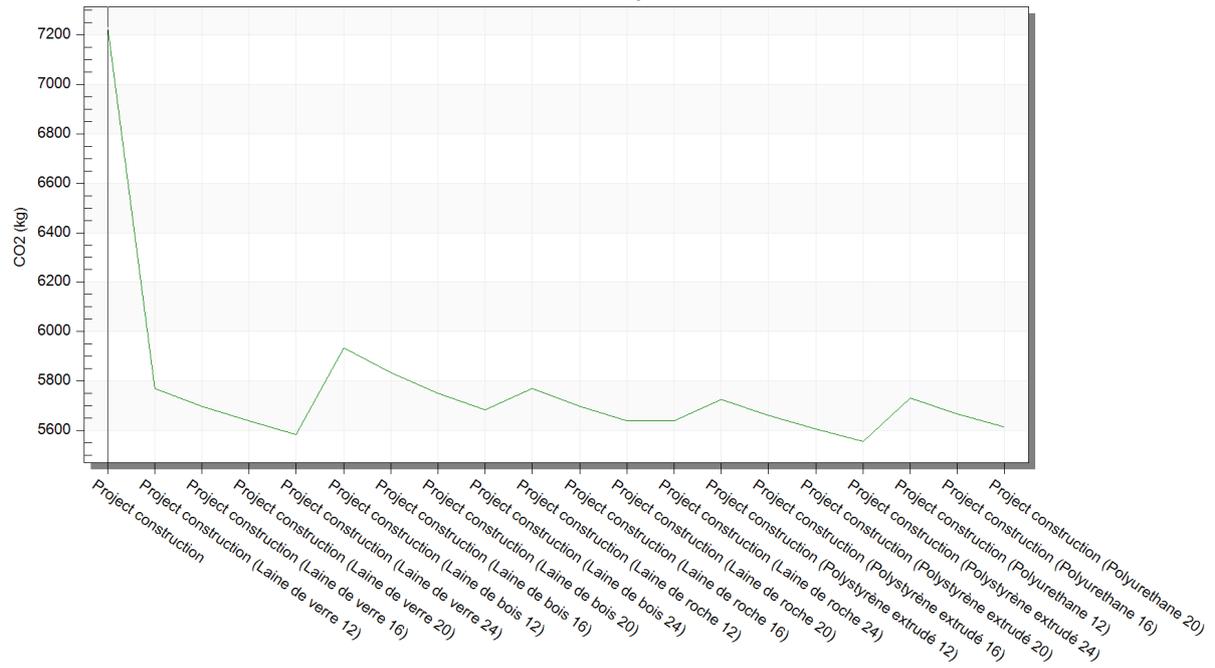


Parametric Analysis Results - Electricité (kWh)
Building 1

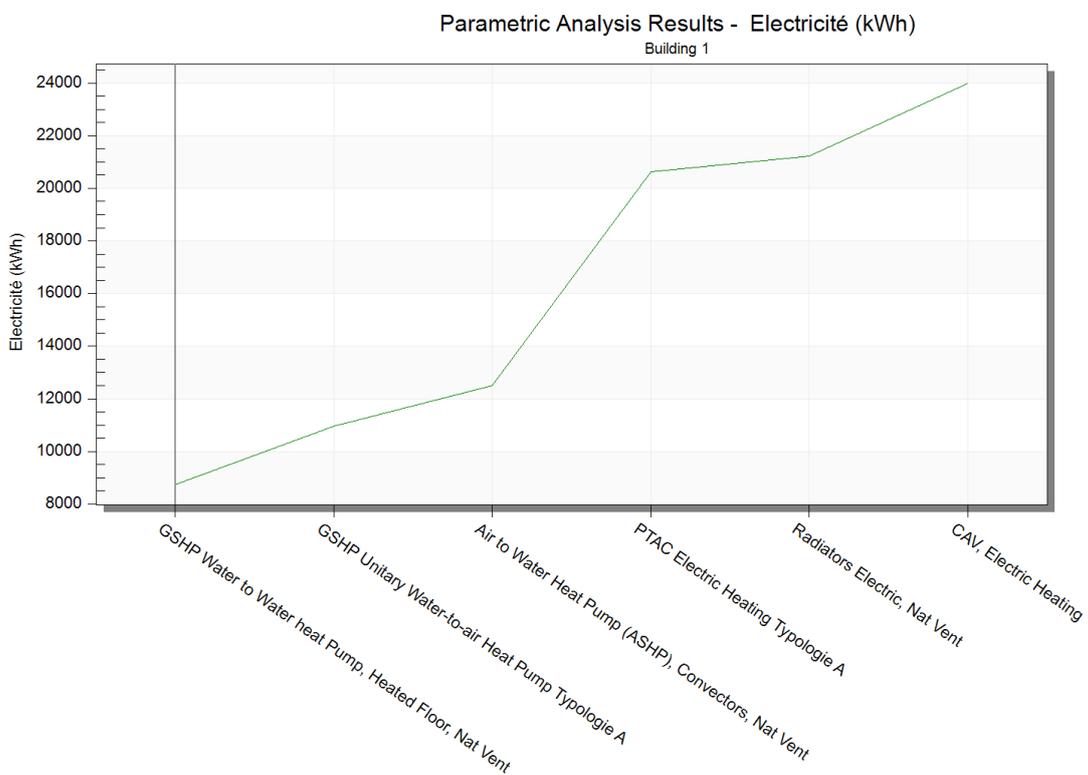
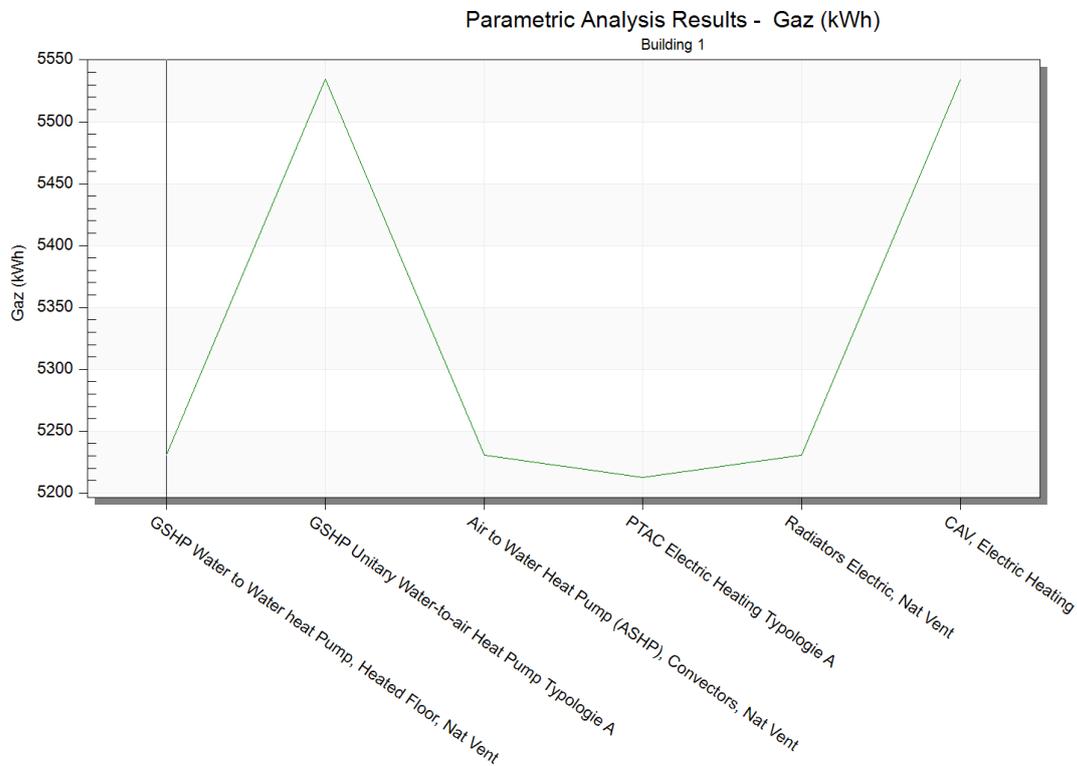


Parametric Analysis Results - CO2 (kg)

Building 1

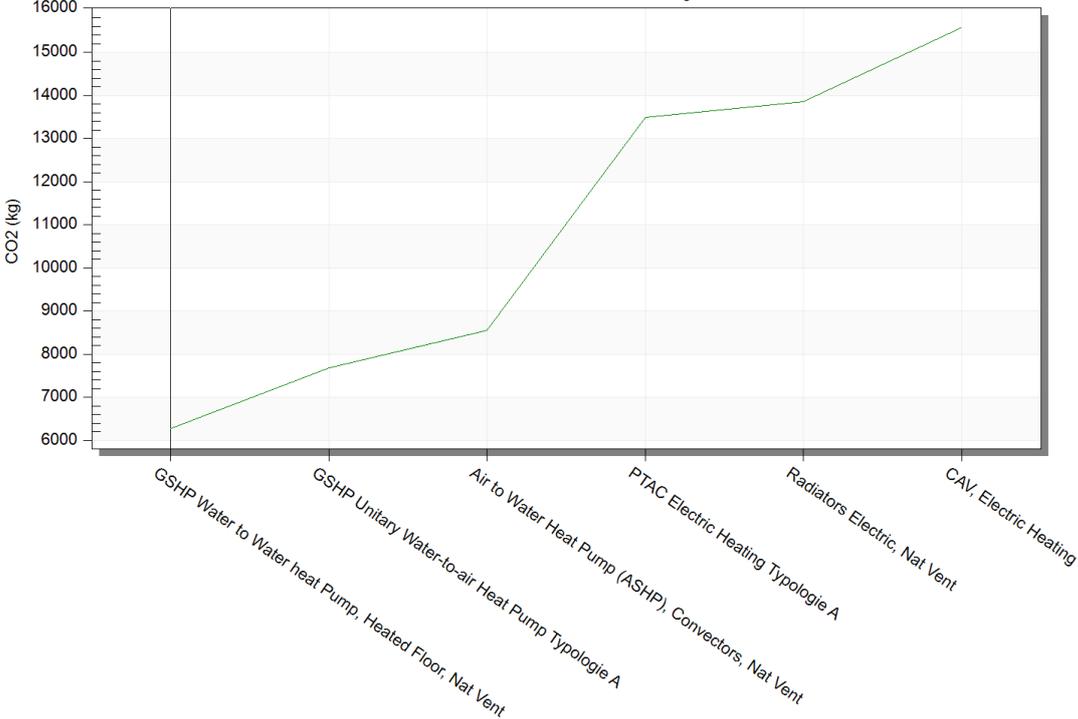


Annexe 6 : Analyse paramétrique pour les systèmes de chauffage

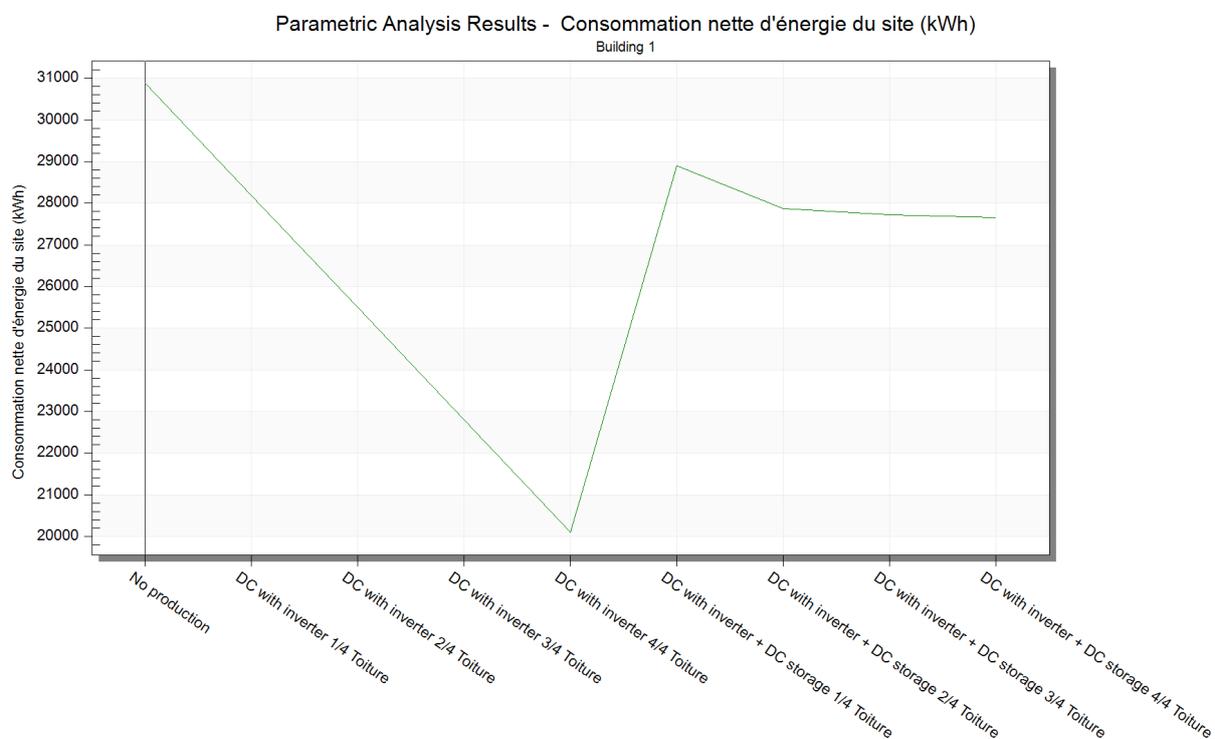
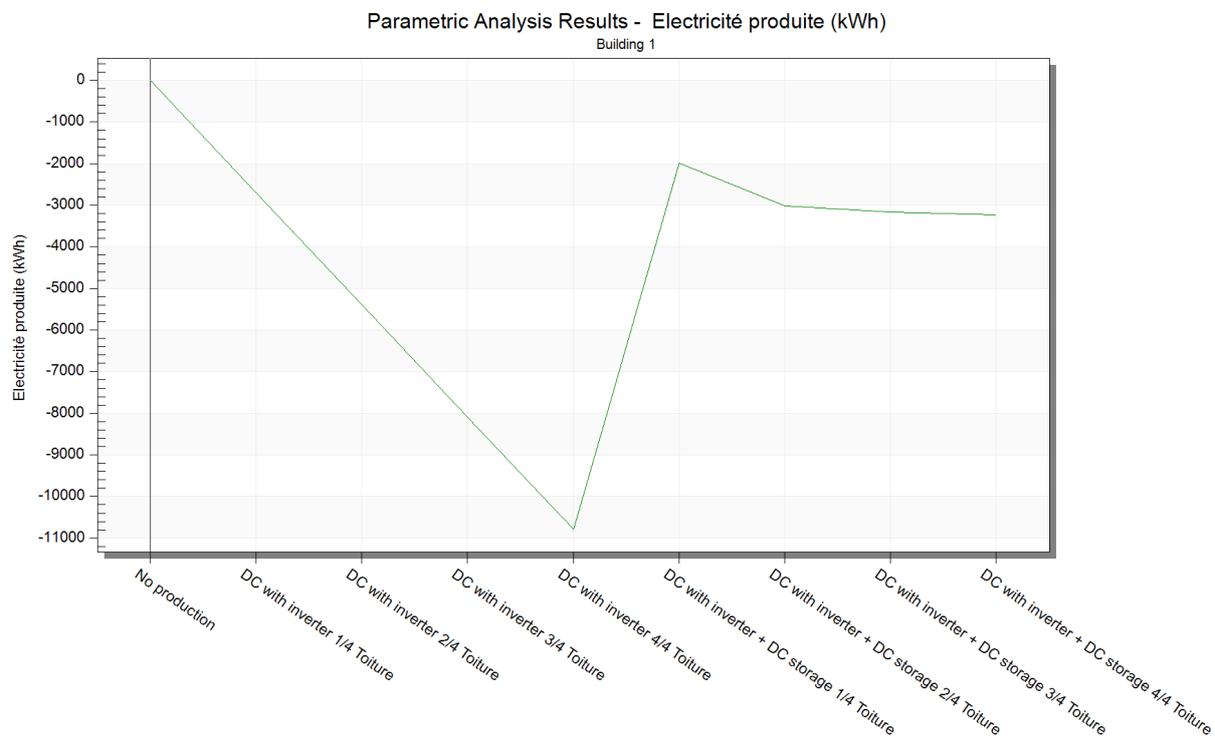


Parametric Analysis Results - CO2 (kg)

Building 1

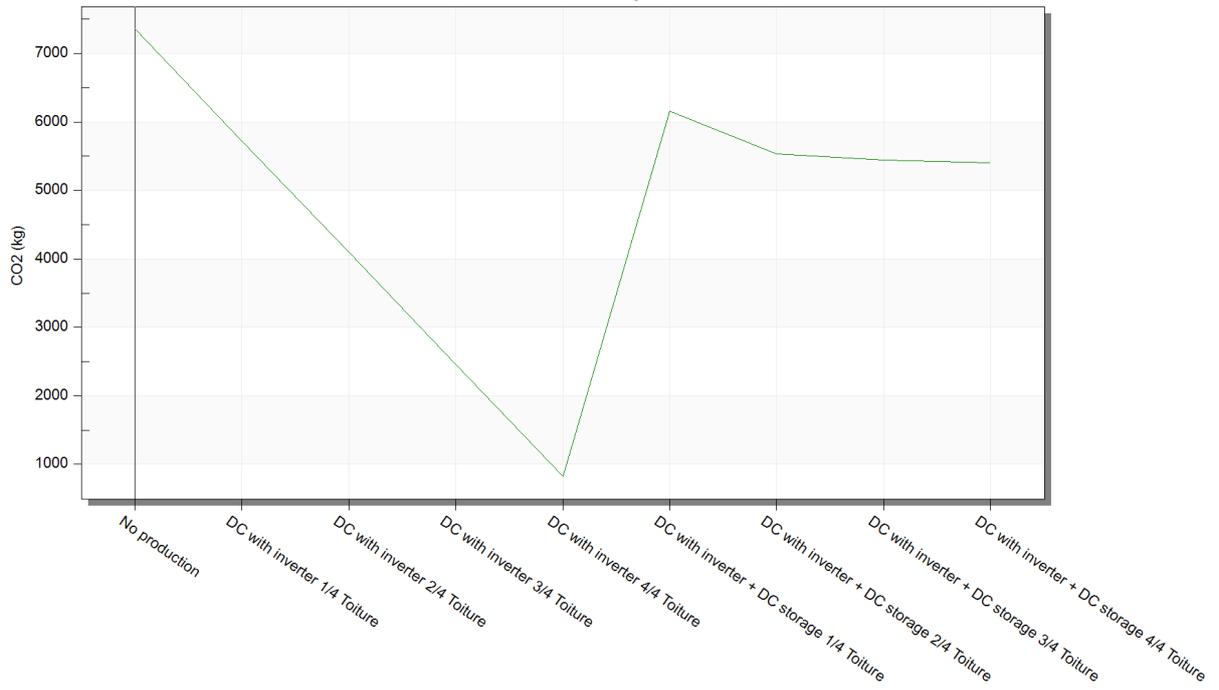


Annexe 7 : Analyse paramétrique pour les panneaux photovoltaïques



Parametric Analysis Results - CO2 (kg)

Building 1



Annexe 7 : SBD Lab Poster



Analyse des coûts optimaux pour une solution de rénovation de bâtiment de l'après-Seconde Guerre mondiale conformément à la RE 2020

Authors: BENITTE Hugo

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

ABSTRACT

L'objectif de cette thèse est d'explorer les possibilités d'optimisation énergétique pour un bâtiment d'après-guerre situé à Nantes, en utilisant les principes des réglementations RE 2020. La recherche se concentre sur l'optimisation de l'enveloppe du bâtiment, des systèmes de chauffage et l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque.

MOTS-CLES

Optimisation énergétique, bâtiments existants, enveloppe du bâtiment, systèmes de chauffage, panneaux photovoltaïques, RE 2020

PROBLEMATIQUE

Cette étude vise à optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments de l'après-Seconde Guerre mondiale à Nantes. Le secteur du bâtiment représente environ 40% de la consommation énergétique et 36% des émissions de CO₂ en Europe (BPIE, 2020). Nous nous concentrons sur la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ de ces bâtiments, qui présentent des défis spécifiques en raison de leurs caractéristiques architecturales et de leur âge. Leur rénovation conforme aux normes actuelles de performance énergétique est essentielle pour atteindre les objectifs de réduction dans le secteur du bâtiment.

OBJECTIF ET HYPOTHESES

Cette étude analyse les défis de l'optimisation énergétique d'un bâtiment d'après-guerre à Nantes, évalue les stratégies d'optimisation, quantifie leur impact sur la consommation d'énergie et les émissions de CO₂, propose des solutions de rénovation optimales, et formule des recommandations pratiques. Des hypothèses sont établies concernant les systèmes de chauffage, les panneaux solaires, les isolants, les conditions d'utilisation, les matériaux conformes aux normes, le comportement des occupants, les données météorologiques, l'état structurel du bâtiment, et les paramètres de performance énergétique.

AUDIENCE

L'audience de cette étude peut être variée et comprendre différents groupes de personnes intéressées par votre domaine de recherche, tels que des communautés universitaires, des professionnels du secteur de la construction et de l'immobilier, des Décideurs politiques, des entreprises et industries et des organisations environnementales

QUESTION DE RECHERCHE

Quelles sont les meilleures stratégies d'optimisation énergétique pour les bâtiments de l'après-seconde guerre mondiale afin de réduire leur consommation d'énergie et leurs émissions de CO₂ selon la RE 2020 ?

ORIGINALITE

Cette étude vient compléter la littérature, car nous appliquons une réglementation environnementale qui est de base pour des bâtiment neuf à une rénovation de bâtiment.

METHODOLOGIE

Nous avons tout d'abord intégré sur le logiciel Design Builder notre modèle, obtenu dans une précédente étude. Puis nous avons réalisé deux optimisations en parallèle, une première en regroupant chaque catégorie de variables et une seconde en faisant travailler toutes les variables ensemble.

RESULTATS

Selon les résultats de l'étude de cas, plusieurs combinaisons de variables ont été testées pour optimiser la performance énergétique de la maison unifamiliale conformément à la réglementation RE 2020. Les variables optimisées comprennent l'isolation des murs extérieurs, l'isolation de la toiture, le système de chauffage et les panneaux photovoltaïques :

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques
Laine de roche (20)	Laine de roche (24)	Radiateurs électriques	Pas de production
Laine de verre (20)	Laine de verre (24)	PAC Air/Eau	1/2 de la toiture
Ouate de cellulose (20)	Ouate de cellulose (24)	PAC Géothermie Eau/Air	1/2 de la toiture
Polystyrène extrudé (16 / 20)	Polystyrène extrudé (20 / 24)	PAC Géothermie Eau/Eau	1/2 de la toiture
Polyuréthane (20)			Toiture entière

Nous obtenons d'un côté une solution la moins coûteuse :

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)	Energie nette (kWh)
Laine de roche 16	Ouate de cellulose 24	Radiateurs électriques	Pas de production	337043	6952	11 730

D'un autre côté les deux solutions les plus coûteuses :

Mur extérieur	Toiture	Système chauffage	Panneaux Photovoltaïques	Coût Total (€)	CO ₂ (eq kg)	Energie nette (kWh)
Polystyrène extrudé 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	426502	641	X
Polyuréthane 20	Polystyrène extrudé 24	PAC Géothermie Eau/Eau	Toiture entière	429 201	X	1 278

Les résultats de cette étude mettent en évidence les stratégies de rénovation énergétique les plus efficaces pour minimiser les coûts tout en maximisant les économies d'énergie. Il a été constaté que l'adoption de mesures d'efficacité énergétique telles que l'isolation thermique, le remplacement des systèmes de chauffage obsolètes par des solutions plus performantes, et l'installation de panneaux photovoltaïques peut conduire à des économies significatives à long terme. Il est recommandé que les praticiens et les décideurs politiques intègrent ces mesures dans leurs projets de rénovation pour atteindre un équilibre optimal entre les coûts initiaux et les économies futures.

CONCLUSION

En résumé, les résultats de l'étude de cas démontrent qu'en optimisant l'isolation, le système de chauffage et en utilisant des panneaux photovoltaïques, il est possible de réduire de manière significative la consommation d'énergie et les émissions de CO₂ d'une maison unifamiliale conformément à la réglementation RE 2020. Toutefois, une analyse coût-efficacité approfondie est nécessaire pour déterminer la meilleure combinaison de variables.

PRINCIPAL REFERENCE

Attia, S., Mustafa, A., Giry, N., Popineau, M., Cuchet, M., & Gulirmak, N. (2021). Developing two benchmark models for post-world war II residential buildings. *Energy and Buildings*, 244, 111052.