

---

## **Travail de Fin d'Etudes : «Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire »**

**Auteur** : Helmus, Romain

**Promoteur(s)** : Attia, Shady

**Faculté** : Faculté des Sciences appliquées

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

**Année académique** : 2019-2020

**URI/URL** : <http://hdl.handle.net/2268.2/10240>

---

### *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 de rénovation énergétique de bâtiments tertiaires en Belgique

# Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire ?

Mémoire de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade d'Ingénieur civil Architecte par **HELMUS Romain**

Promoteur : Professeur ATTIA Shady

Jury : BRANDT Muriel, MANS Didier, REITER Sigrid, RUELLAN Guirec

Année académique 2019-2020

# RÉSUMÉ

---

*Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire ?*

Ce mémoire étudie des possibilités de rénovation énergétique d'un bâtiment tertiaire en Wallonie. Il consiste en une analyse comparative des résultats quantitatifs de l'analyse de cycle de vie et des coûts de cycle de vie de six configurations d'étude. Celles-ci reprennent le cas du bâtiment existant, une rénovation minimaliste, deux rénovations passives et deux reconstructions respectant le « label passif » plus.

Ce travail de recherche est réalisé en partenariat avec le bureau d'ingénierie et de conseil *Écorce* à Liège, sur un cas d'étude réel, et est destiné autant aux industriels qu'aux architectes et aux chercheurs.

L'objectif de ce mémoire est d'informer les chercheurs et professionnels de la construction et de servir d'outil d'aide à la prise de décision avant d'entreprendre une rénovation énergétique d'un bâtiment existant.

# ABSTRACT

---

*Should a tertiary building be demolished and then rebuilt or renovated for energy efficiency?*

This thesis studies the possibilities of energy renovation of a tertiary building in Wallonia. It consists of a comparative analysis of the quantitative results of the life cycle analysis and the life cycle costs of six study configurations. These take the case of the existing building, one minimalist renovation, two passive renovations and two reconstructions respecting the “passive plus” label.

This research work is carried out in partnership with the engineering and consulting firm *Écorce* in Liège, on a real case study, and is intended for industrials as well as architects and researchers.

The aim of this thesis is to inform researchers and building professionals and to serve as a decision-making tool before undertaking an energy renovation of an existing building.

# SOMMAIRE

---

Le changement climatique est une réalité qui touche de plus en plus de personnes et de lieux sur Terre. Une des conséquences les plus visibles de ce changement est la hausse des températures, notamment causée par l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle.

En réponse à ces constats est né le concept de développement durable, ayant pour objectif de sensibiliser les acteurs du développement économique et de diminuer leur impact sur l'environnement. Parmi ces acteurs, le secteur de la construction compte pour 40% des émissions de CO<sub>2</sub> et environ 37% de la consommation énergétique mondiale.

La Région Wallonne, comme de nombreux autres organismes, a mis en place diverses lois et standards relatifs au secteur de la construction afin de diminuer son impact environnemental et sa consommation énergétique. On y retrouve les labels passifs et NZEB (Nearly Zero Energy Building) par exemple. Il est clair que le secteur de la construction a un rôle majeur à jouer dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

L'objectif de ce travail est de déterminer, via une approche comparative, les éléments favorables à la reconstruction passive ou à la rénovation passive d'un bâtiment tertiaire actuellement peu performant d'un point de vue énergétique et de répondre à la question de synthèse suivante : « **Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire ?** »

La méthodologie de ce travail, développée dans le chapitre 3, suit un procédé de recherche quantitative, basée sur la modélisation de six configurations d'étude différentes, dans le but de répondre à une question pratique en partenariat avec le bureau d'ingénierie et de conseil *Écorce* à Liège.

Le travail de recherche s'articule en deux grandes phases. La première comprend les étapes de modélisation des différentes configurations d'étude, de simulation énergétique de celles-ci et d'établissement de la table des coûts relatifs à chaque matériau ou type d'énergie rencontré. La seconde comprend les étapes d'analyse de cycle de vie (du berceau à la tombe) et de bilan financier ou analyse de cycle des coûts de chaque configuration.

Une étude comparative des résultats de la seconde phase est ensuite réalisée afin de déterminer la configuration de rénovation ou de reconstruction optimum en fonction des conditions initiales.

Le bâtiment étudié dans le cadre de ce mémoire est le bâtiment Marie Curie, siège administratif de la Province du Brabant Wallon, à Wavre. Son étude se décline en six configurations d'étude présentées dans le chapitre 4 : le bâtiment existant, une rénovation

minimaliste, deux rénovations passives et deux reconstructions passives plus. Chacun des cas de rénovation passive et de reconstruction passive plus est décliné en construction traditionnelle et en construction en ossature bois.

Chaque configuration est modélisée en BIM (Building Information Modelling) via le logiciel *Autodesk Revit* afin d'en obtenir les quantités de matériaux et autres données utiles, et analysée sous différents aspects dans le chapitre 5 où sont développées la consommation énergétique, l'analyse de cycle de vie et l'étude des coûts.

Une simulation énergétique statique est réalisée pour chacune des configurations via le logiciel *PHPP*, ce qui permet de déterminer les besoins de chauffage, de refroidissement et en électricité. On constate que les besoins de chauffage et de refroidissement diminuent logiquement avec l'augmentation de l'intensité de rénovation.

L'analyse de cycle de vie est effectuée du berceau à la tombe pour chaque matériau présent dans chaque configuration d'étude. Les indicateurs environnementaux pris en compte dans le cadre de ce travail sont ceux qui se rapportent le plus directement au problème de changement climatique et à la dégradation de l'environnement explicités dans l'introduction. On retrouve donc le réchauffement climatique (kg CO<sub>2</sub>), l'acidification des sols (kg SO<sub>2</sub>), l'eutrophisation des eaux (kg PO<sub>4</sub>) et la consommation en énergie primaire (MJ).

L'étude des coûts est effectuée sur les coûts de déconstruction, de rénovation, de reconstruction et d'utilisation du bâtiment. Ces coûts d'utilisation sont considérés à partir des simulations énergétiques réalisées en amont. Le remplacement des éléments dont la durée de vie est inférieure à la période d'étude des différentes configurations, à savoir 50 ans dans un premier temps, sont également pris en compte, que ce soit au niveau des coûts comme de l'analyse de cycle de vie.

Les résultats de chacune des analyses de cycle de vie et analyses des coûts de cycle de vie sont ensuite compilés et comparés de manière objective dans le chapitre 6, sur des périodes de 50 ans, 100 ans et enfin 150 ans.

Le chapitre 7 traite ces résultats plus subjectivement. Les découvertes et les recommandations principales qui découlent de ce travail sont développées, suivies par les forces et limitations de l'étude ; et enfin des conseils pratiques ou destinés à de futures recherches.

Enfin, ce mémoire se conclut de manière nuancée, au chapitre 8, sur les qualités des propositions de rénovation et de reconstruction, à moyen comme à long terme, et sur la nécessité d'investir dans la rénovation énergétique afin de ralentir le réchauffement climatique et de sauvegarder notre environnement actuel.

Je remercie Monsieur Shady Attia et Monsieur Guirec Ruellan pour l'inspiration, l'aide, le suivi et le temps qu'ils m'ont accordés tout au long de ce travail. Je remercie aussi monsieur Attia en particulier pour son rôle de promoteur compétent ainsi que pour les idées partagées qui m'ont permis d'emmener ce travail de fin d'étude vers la direction qu'il a prise.

Je remercie Madame Muriel Brandt, à la barre du bureau Écorce, pour l'expérience qu'elle m'a partagée, la patience, l'encadrement et la justesse de ses réflexions ainsi que pour sa flexibilité dans le choix des configurations d'étude de ce travail.

Je remercie également les membres de mon jury, Madame Sigrid Reiter et Monsieur Didier Mans, pour l'intérêt qu'ils ont témoigné pour ce travail, et pour le temps qu'ils auront consacré à l'apprécier.

Je remercie les membres de ma famille, avec leurs qualités et leurs personnalités diverses, pour leur soutien, leur présence et leurs conseils. Je remercie aussi Maître Pierre Franssen pour le support technique qu'il m'a apporté.

Je tiens pour finir à remercier l'ensemble des professeurs dont j'ai eu le plaisir de partager les connaissances durant mon parcours académique à l'Université de Liège, ainsi que les étudiants avec qui j'ai évolué tout au long de mon parcours.

« Nous ne sortirons pas le monde de la crise  
si nous ne changeons pas notre manière de penser »

Albert Einstein



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>État de l’art &amp; concepts.....</b>	<b>20</b>
2.1	Cycle de vie .....	22
2.2	Analyse de cycle de vie d’un bâtiment .....	23
2.2.1	Objectif et champ d’étude d’une ACV.....	23
2.2.2	Analyse de l’inventaire d’une ACV .....	24
2.2.3	Évaluation de l’impact d’ACV .....	25
2.2.4	Interprétation des résultats de l’ACV.....	26
2.3	Coût du cycle de vie d’un bâtiment.....	27
2.3.1	Les coûts de construction.....	27
2.3.2	Les coûts de maintenance.....	27
2.3.3	Les coûts d’utilisation.....	27
2.3.4	Les coûts de fin de vie .....	29
2.4	Bâtiment passif .....	30
<b>3</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>31</b>
3.1	Processus du travail .....	31
3.2	Logiciels et bases de données .....	34
3.3	Hypothèses et choix de travail .....	35
<b>4</b>	<b>Configurations d’étude .....</b>	<b>38</b>
4.1	Présentation du bâtiment d’étude .....	39
4.2	Présentation des configurations d’étude .....	40
4.2.1	EX – Bâtiment existant .....	42
4.2.2	R0 – Rénovation minimaliste .....	43
4.2.3	R1 – Rénovation traditionnelle passive.....	44
4.2.4	R2 – Rénovation ossature bois passive .....	46
4.2.5	NC1 – Reconstruction traditionnelle passive + .....	48
4.2.6	NC2 – Reconstruction ossature bois passive +.....	50
4.3	Synthèse des configurations d’étude .....	52

<b>5</b>	<b>Analyse des configurations d'étude .....</b>	<b>53</b>
5.1	EX – Bâtiment existant.....	55
5.1.1	Consommation énergétique .....	55
5.1.2	Analyse de cycle de vie.....	56
5.1.3	Étude des coûts .....	58
5.1.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	58
5.2	R0 – Rénovation minimaliste.....	59
5.2.1	Consommation énergétique .....	59
5.2.2	Analyse de cycle de vie.....	60
5.2.3	Étude des coûts .....	62
5.2.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	62
5.3	R1 – Rénovation traditionnelle passive .....	63
5.3.1	Consommation énergétique .....	63
5.3.2	Analyse de cycle de vie.....	64
5.3.3	Étude des coûts .....	66
5.3.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	66
5.4	R2 – Rénovation ossature bois passive .....	67
5.4.1	Consommation énergétique .....	67
5.4.2	Analyse de cycle de vie.....	68
5.4.3	Étude des coûts .....	70
5.4.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	70
5.5	NC1 – Reconstruction traditionnelle passive+ .....	71
5.5.1	Consommation énergétique .....	71
5.5.2	Analyse de cycle de vie.....	73
5.5.3	Étude des coûts .....	75
5.5.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	75
5.6	NC2 – Reconstruction ossature bois passive+ .....	76
5.6.1	Consommation énergétique .....	76
5.6.2	Analyse de cycle de vie.....	78
5.6.3	Étude des coûts .....	80
5.6.4	Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV .....	80

<b>6</b>	<b>Résultats comparatifs .....</b>	<b>81</b>
6.1	Comparaison des différentes configurations sur une durée de vie de 50 ans.....	82
6.2	Comparaison des différentes configurations sur une durée de vie de 100 ans.....	85
6.3	Comparaison des différentes configurations sur une durée de vie de 150 ans.....	88
<b>7</b>	<b>Discussion .....</b>	<b>91</b>
7.1	Découvertes et recommandations .....	92
7.2	Forces et limitations de l'étude .....	93
7.3	Effets en pratique et pour de futures recherches.....	95
<b>8</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>96</b>

# LISTE DES FIGURES

---

Figure 1-1 Evolution de la température de l'hémisphère Nord depuis 2000 ans (Les Crises, 2013).....	14
Figure 1-2 Evolution de la température de la planète et de la concentration en CO <sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis 800 000 ans (Les Crises, 2013).....	15
Figure 1-3 Schéma du développement durable.....	16
Figure 2-1 Les différentes phases du cycle de vie. (Janssen et al., 2013).....	22
Figure 2-2 phases du cycle de vie (Hoyet, 2017; Janssen et al., 2013).....	22
Figure 2-3 Phases de l'analyse de cycle de vie.....	23
Figure 2-4 Phases et processus d'analyse de cycle de vie d'un matériau, produit de construction ou bâtiment.....	24
Figure 2-5 Évolution du prix de l'électricité pour des petits consommateurs en Belgique entre 2008 et 2019 (Eurostat, 2020).....	28
Figure 2-6 Labels passifs.....	30
Figure 3-1 Processus du travail – schéma explicatif.....	31
Figure 3-2 Processus du travail – découpe du travail en phases.....	32
Figure 3-3 Durée de vie d'éléments de construction (Attia, 2019).....	33
Figure 3-4 Phases de l'analyse de cycle de vie prises en compte dans les calculs.....	35
Figure 4-1 Extension du bâtiment Marie Curie à Wavre dit "le cube".....	39
Figure 4-2 Répartition des 6 configurations d'étude.....	40
Figure 4-3 Coupe EX – Bâtiment existant.....	42
Figure 4-4 Coupe R0 – Rénovation minimaliste.....	43
Figure 4-5 Coupe R1 – Rénovation traditionnelle passive.....	44
Figure 4-6 Coupe R2 – Rénovation ossature bois passive.....	46
Figure 4-7 Coupe NC1 – Reconstruction traditionnelle passive +.....	48
Figure 4-8 Coupe NC2 – Reconstruction ossature bois passive +.....	50
Figure 4-9 Synthèse des configurations d'étude.....	52
Figure 5-1 Bâtiment existant, modélisation 3D.....	55
Figure 5-2 Besoin de chauffage EX – Bâtiment existant (PHPP).....	55
Figure 5-3 Besoin de refroidissement EX – Bâtiment existant (PHPP).....	56
Figure 5-4 ACV EX – Réchauffement climatique.....	56
Figure 5-5 ACV EX – Acidification des sols.....	57
Figure 5-6 ACV EX – Eutrophisation des eaux.....	57
Figure 5-7 ACV EX – Consommation en énergie primaire.....	57
Figure 5-8 EX – Étude des coûts.....	58
Figure 5-9 Rénovation minimaliste, modélisation 3D.....	59
Figure 5-10 Besoin de chauffage R0 – Rénovation minimaliste (PHPP).....	59
Figure 5-11 Besoin de refroidissement R0 – Rénovation minimaliste (PHPP).....	60
Figure 5-12 ACV R0 – Réchauffement climatique.....	60
Figure 5-13 ACV R0 – Acidification des sols.....	61

Figure 5-14 ACV R0 – Eutrophisation des eaux .....	61
Figure 5-15 ACV R0 – Consommation en énergie primaire .....	61
Figure 5-16 R0 – Étude des coûts .....	62
Figure 5-17 Rénovation traditionnelle passive, modélisation 3D .....	63
Figure 5-18 Besoin de chauffage R1 – Rénovation traditionnelle passive (PHPP).....	63
Figure 5-19 Besoin de refroidissement R1 – Rénovation traditionnelle passive (PHPP) .....	64
Figure 5-20 ACV R1 – Réchauffement climatique .....	64
Figure 5-21 ACV R1 – Acidification des sols .....	65
Figure 5-22 ACV R1 – Eutrophisation des eaux.....	65
Figure 5-23 ACV R1 – Consommation en énergie primaire .....	65
Figure 5-24 R1 – Étude des coûts .....	66
Figure 5-25 Rénovation ossature bois passive, modélisation 3D .....	67
Figure 5-26 Besoin de chauffage R2 – Rénovation ossature bois passive (PHPP) .....	67
Figure 5-27 Besoin de refroidissement R2 – Rénovation ossature bois passive (PHPP) .....	68
Figure 5-28 ACV R2 – Réchauffement climatique .....	68
Figure 5-29 ACV R2 – Acidification des sols .....	69
Figure 5-30 ACV R2 – Eutrophisation des eaux.....	69
Figure 5-31 ACV R2 – Consommation en énergie primaire .....	69
Figure 5-32 R2 – Étude des coûts .....	70
Figure 5-33 Reconstruction traditionnelle passive+, modélisation 3D .....	71
Figure 5-34 Besoin de chauffage NC1 – Reconstruction traditionnelle passive+ (PHPP) .....	71
Figure 5-35 Besoin de refroidissement NC1 – Reconstruction traditionnelle passive+ (PHPP) .....	72
Figure 5-36 ACV NC1 – Réchauffement climatique .....	73
Figure 5-37 ACV NC1 – Acidification des sols.....	73
Figure 5-38 ACV NC1 – Eutrophisation des eaux .....	73
Figure 5-39 ACV NC1 – Consommation en énergie primaire.....	74
Figure 5-40 NC1 – Étude des coûts .....	75
Figure 5-41 Reconstruction ossature bois passive+, modélisation 3D .....	76
Figure 5-42 Besoin de chauffage NC2 – Reconstruction ossature bois passive+ (PHPP).....	76
Figure 5-43 Besoin de refroidissement NC2 – Reconstruction ossature bois passive+ (PHPP).....	77
Figure 5-44 ACV NC2 – Réchauffement climatique .....	78
Figure 5-45 ACV NC2 – Acidification des sols.....	78
Figure 5-46 ACV NC2 – Eutrophisation des eaux .....	78
Figure 5-47 ACV NC2 – Consommation en énergie primaire.....	79
Figure 5-48 NC2 – Étude des coûts .....	80
Figure 6-1 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 50 ans..	82
Figure 6-2 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 50 ans .....	83
Figure 6-3 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 100 ans	85
Figure 6-4 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 100 ans .....	86
Figure 6-5 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 150 ans	88
Figure 6-6 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 150 ans .....	89

# LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 2-1 Prix de l'électricité en Belgique entre 2015 et 2019 (Eurostat, 2020).....	28
Tableau 2-2 Prix du mazout de chauffage en Belgique entre 2013 et 2020 (Statbel, 2020)...	28
Tableau 2-3 Prix des panneaux solaires (PrixTravauxm <sup>2</sup> .com, 2020) .....	29
Tableau 4-1 Composition des parois EX – Bâtiment existant .....	42
Tableau 4-2 Composition des parois R0 – Rénovation minimaliste.....	43
Tableau 4-3 Composition des parois R1 – Rénovation traditionnelle passive.....	45
Tableau 4-4 Composition des parois R2 – Rénovation ossature bois passive .....	47
Tableau 4-5 Composition des parois NC1 – Reconstruction traditionnelle passive + .....	49
Tableau 4-6 Composition des parois NC2 – Reconstruction ossature bois passive +.....	51
Tableau 4-7 Valeurs U des parois.....	52
Tableau 6-1 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 50 ans .....	82
Tableau 6-2 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 50 ans .....	83
Tableau 6-3 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 100 ans .....	85
Tableau 6-4 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 100 ans .....	86
Tableau 6-5 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 150 ans .....	88
Tableau 6-6 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 150 ans .....	89

# 1

## INTRODUCTION

Le changement climatique était, il y a quelques dizaines d'années seulement, un concept exclusivement évoqué par quelques scientifiques ou activistes pour la planète. Aujourd'hui, en 2020, le changement climatique est une réalité incontestable qui touche toutes les régions du monde. Les calottes glaciaires fondent et le niveau des Océans est en hausse. Dans certaines régions, les phénomènes météorologiques extrêmes et les précipitations sont de plus en plus fréquents, tandis que d'autres sont confrontées à des vagues de chaleur et des sécheresses de plus en plus extrêmes. Ces effets devraient s'intensifier au cours des prochaines décennies (Commission européenne, 2016).

La Figure 1-1 montre l'évolution de la température de l'hémisphère Nord depuis 2000 ans. La courbe marque une très forte tendance à la hausse à partir de 1800, ce qui correspond au début de la période industrielle des pays développés, estimé entre 1760 et 1770 (Universalis, 1997).

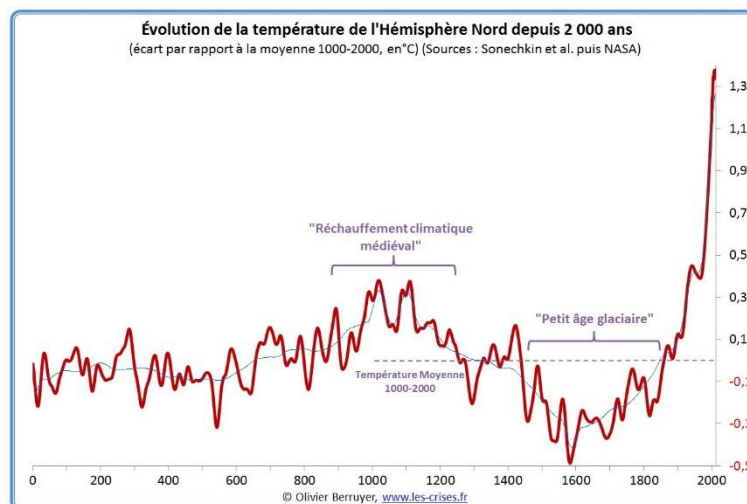


Figure 1-1 Evolution de la température de l'hémisphère Nord depuis 2000 ans (Les Crises, 2013)

L'augmentation brusque de la température des deux derniers siècles semble donc fortement liée à l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'industrialisation actuelle. Cette hypothèse est confirmée par la corrélation entre la concentration en CO<sub>2</sub> et la température terrestre que l'on peut voir sur la Figure 1-2. Lors des évolutions classiques de la température sur Terre, les concentrations de CO<sub>2</sub> atteignaient des pics de concentration de moins de 300

ppm. À l'heure actuelle, on recense un pic de température semblable à des cas précédents, mais la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère atteint près de 400 ppm, ce qui est inédit.

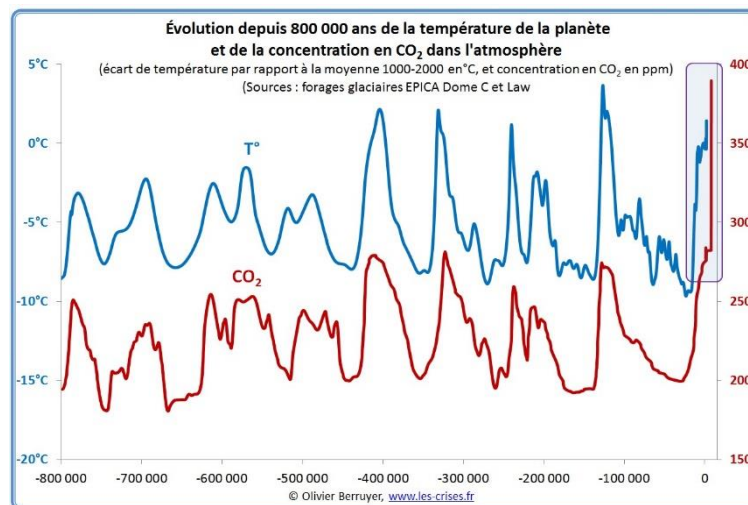


Figure 1-2 Evolution de la température de la planète et de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère depuis 800 000 ans (Les Crises, 2013)

La température de la planète a déjà augmenté de 2°C depuis le début de l'ère industrielle. Un point de vue pessimiste sur son évolution future annonce une augmentation de 6°C, tandis qu'un point de vue optimiste pourrait voir une augmentation de 1°C au cours du siècle (Les Crises, 2013).

En Europe par exemple, le bassin méditerranéen devient de plus en plus sec, ce qui le rend de plus en plus vulnérable aux sécheresses et aux incendies. L'Europe du Nord par contre devient de plus en plus humide, et les inondations hivernales risquent de se produire fréquemment. Entre 1980 et 2011, ces incidents climatiques ont touché plus de 5,5 millions de personnes et ont provoqué des pertes économiques directes pour plus de 90 milliards d'euros (Commission européenne, 2016).

A la suite de ces différents éléments est née la base du concept de développement durable.

Le mouvement se construit sous une idée d'éco-développement via le Club de Rome (1972), un groupe d'industriels, de scientifiques, d'économistes et de diplomates qui ont commencé à s'interroger sur l'influence de l'homme sur l'environnement. Il s'en suit La première conférence des Nations Unies sur l'Homme et son milieu, connue également sous le nom de *Conférence des Nations Unies pour l'Environnement Humain*, à Stockholm. Cette dernière s'est soldée par un échec (Université de Valenciennes, 2012).

C'est le Rapport Brundtland, en 1987, qui pose la définition « officielle » du **développement durable**. Il a servi de base de discussion dans les négociations internationales qui ont précédé et prolongé le sommet de Rio en 1992. (Université de Valenciennes, 2012) On



notera que la traduction exacte du terme « *sustainable development* » est « développement soutenable », un terme qui marque plus encore la volonté de porter le concept à long terme.

Le sommet de Rio, via la déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, énonce 27 grands principes qui placent les ressources, le développement et l'environnement au même niveau. Ce sommet conduit également à l'adoption du programme Agenda 21, qui comprend environ 2500 recommandations pour le XXI<sup>ème</sup> siècle ; il constitue une sorte de prototype de "contrat global" censé représenter un consensus mondial et un engagement politique.

L'Agenda 21 comporte quatre sections abordant :

- les dimensions sociales et économiques ;
- les problèmes environnementaux ;
- le rôle des acteurs ;
- les moyens d'exécution des programmes.

L'agenda 21 se décline en 21 étapes à respecter pour 5 finalités :

- la lutte contre le changement climatique ;
- la préservation de la biodiversité ;
- la cohésion sociale ;
- les modes de production responsable ;
- l'épanouissement humain.

L'Agenda 21 reste le "guide" du développement durable qui aujourd'hui fait le plus autorité.

« Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. » (Brundtland, 1987).

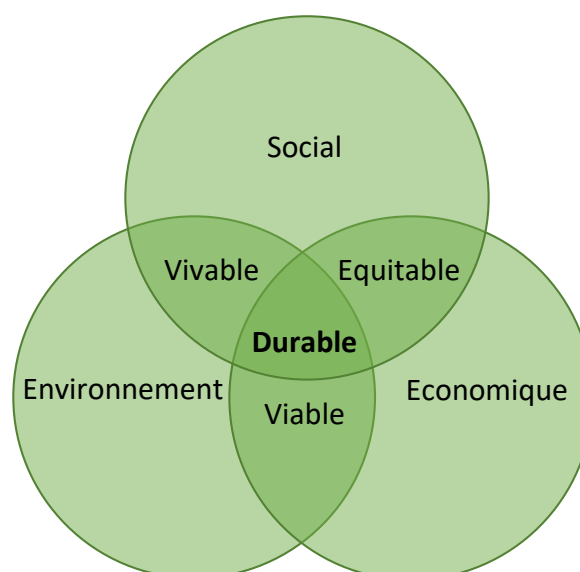


Figure 1-3 Schéma du développement durable

Le développement durable se construit de nos jours sur trois piliers : des enjeux sociaux, des enjeux économiques, et des enjeux environnementaux. Chaque combinaison de deux de ces trois piliers fait naître des contradictions et des paradoxes inhérents à leurs natures.

Le développement durable touche tous les secteurs de production et de consommation. Parmi ceux-ci, le secteur de la construction est largement représenté.

Le secteur de la construction représente à lui seul environ 50% de la consommation mondiale en matières premières. En Belgique, le chauffage et l'éclairage des bâtiments représentent 42% de la consommation totale en énergie. Le secteur de la construction est également un grand producteur de déchets (de construction et de démolition) (Van Dessel & Putzeys, 2007).

Des chiffres sortants d'une étude française, relatent que le secteur du bâtiment représente, à l'échelle mondiale (Deshayes, 2012):

- 40% des émissions de CO<sub>2</sub> (des pays développés) ;
- 37% de la consommation d'énergie ;
- 40% des déchets produits.

Notre planète possède des ressources limitées, c'est un fait. Il est aujourd'hui primordial d'agir en conséquence et de travailler à baisser la consommation en énergie de tout un chacun. Les chiffres présentés ci-dessus montrent clairement que le secteur du bâtiment, en limitant sa consommation énergétique, a un grand pouvoir d'impact sur les émissions de CO<sub>2</sub>, sur la consommation d'énergie ainsi que sur la production de déchets.

La Région wallonne, comme de nombreuses autres institutions gouvernementales, accélère la prise en compte de ce fait dans les décisions qu'elle prend depuis le début du XXI<sup>ème</sup> siècle. À partir du 1<sup>er</sup> janvier 2021, les exigences PEB (Performance Energétique du Bâtiment) seront renforcées pour les nouvelles constructions. Les bâtiments à construire doivent atteindre le standard NZEB (Nearly Zero Energy Building) ou Q-ZEN (bâtiment dont la consommation est quasi nulle ou bâtiment Quasi Zéro ENergie). En rénovation, les exigences applicables depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2017 ne changent pas (SPW Energie, 2017).

L'avancée technologique tant en techniques de construction qu'en chimie et physique des matériaux des dernières années promet encore de nombreuses améliorations dans les techniques de construction. Il est primordial de continuer à faire évoluer notre manière de construire afin d'utiliser au mieux notre potentiel et de limiter notre impact environnemental.

Albert Einstein a dit un jour : « Nous ne sortirons pas le monde de la crise si nous ne changeons pas notre manière de penser ». La crise à laquelle je m'intéresse dans le cadre de ce travail est une crise environnementale, pour laquelle c'est ici la manière de penser notre façon de construire et d'utiliser notre patrimoine immobilier qu'il faut changer.

La question que je me pose est donc la suivante : comment réduire de manière optimale notre consommation énergétique dans le secteur du bâtiment ?

Cette question englobe un grand nombre de sous-sujets, trop nombreux et trop vastes pour être traités dans un seul travail de fin d'études. J'ai donc décidé de me pencher sur un secteur moins étudié jusqu'à présent, le secteur tertiaire, en Wallonie en particulier.

Afin de réduire la consommation d'un bâtiment tertiaire, on a le choix entre plusieurs alternatives. On peut diminuer la consommation des utilisateurs. Cette option est très limitée dans le secteur tertiaire étant donné que leur consommation dépend plus du travail qu'ils ont à effectuer que de leur comportement. Il faut donc diminuer la consommation du bâtiment en tant que tel.

Les bâtiments tertiaires, de par leur habituelle grande taille et modularité d'espaces intérieurs, ont souvent une structure de type « poteaux-poutres ». Il est aisé de déterminer si cette structure est en bon état ou non, et donc de déterminer s'il est concevable de rénover le bâtiment. Cela amène donc le propriétaire qui a la volonté d'améliorer les performances thermiques de son bâtiment face à un dilemme. Il peut soit rénover le bâtiment existant afin d'améliorer son isolation, son étanchéité, etc., ou décider de le démolir afin de reconstruire un bâtiment neuf plus performant.

L'objectif de ce travail est de déterminer, via une approche comparative, les éléments favorables à la reconstruction passive ou à la rénovation passive d'un bâtiment tertiaire actuellement peu performant d'un point de vue énergétique.

Je vais tenter de réaliser cet objectif, d'abord d'un point de vue énergétique. L'enjeu principal de la rénovation ou de la reconstruction est au final de préserver à long terme notre environnement et nos ressources naturelles. Une analyse de cycle de vie (ACV) permet la comparaison de différentes alternatives d'évolution du bâtiment via une quantification des ressources utilisées et des émissions environnementales associées au système étudié (Reiter, 2010). Il s'agit ici du bâtiment dans sa globalité, depuis son état initial jusqu'à sa fin de vie. Cette analyse sur le cas existant donne quant à elle une référence exploitable dans le cadre de ce travail.

Ensuite, il me paraît plus qu'important d'étudier le coût financier d'une rénovation ou d'une reconstruction d'un bâtiment tertiaire pour le propriétaire. Notre société actuelle exige la rentabilité économique pour agir. Il est donc nécessaire qu'un bâtiment énergétiquement performant ait un coût de revient final inférieur à son homologue en construction traditionnelle pour que les opérations de rénovation ou de reconstruction soient entreprises. Pour approfondir cette idée, je trouve également intéressant de déterminer à quel stade de la vie d'un bâtiment tertiaire celui-ci devient rentable énergétiquement et/ou économiquement.

La question de synthèse qui va servir de ligne directrice dans ce travail de fin d'étude est donc la suivante : « **Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire ?** »

Les points d'intérêt principaux relevés dans cette introduction sont l'impact environnemental des bâtiments tertiaires, l'impact économique pour un propriétaire d'améliorer les performances thermiques d'un bâtiment, et enfin la diminution, à long terme, de l'impact du secteur de la construction sur le réchauffement climatique. Ces trois points d'intérêt peuvent être traités de manière séquentielle en subdivisant la question de synthèse énoncée précédemment en trois sous-questions.

1. Quels sont les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive sur l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment tertiaire ?
2. Quels sont les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive sur les coûts de cycle de vie d'un bâtiment tertiaire ?
3. Comment évoluent les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive à long terme ?

Pour répondre à ces questions, j'ai décidé d'analyser un même immeuble de bureaux dans six configurations différentes. On retrouve en premier le cas du bâtiment existant sans rénovation qui servira de base de comparaison, ensuite un cas de rénovation minimaliste sans effectuer de démolition. Viennent ensuite deux cas de rénovation passive intermédiaire (murs extérieurs et toiture) et deux cas de reconstruction passive plus.

Ce travail se compose de trois parties principales :

La première partie comprend en guise d'état de l'art de ce travail reprenant les bases techniques spécifiques aux concepts principaux abordés dans le cadre de mon étude tels l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment ou encore le concept de bâtiment passif.

La seconde partie comprend la méthodologie mise en œuvre, les descriptions et les analyses des différentes configurations d'étude ainsi que les résultats relatifs à chacune d'elles.

La troisième partie comprend une analyse comparative de l'ensemble des configurations d'étude, suivie de la conclusion du travail.

# 2

## ÉTAT DE L'ART & CONCEPTS

---

Ce chapitre présente quelques références de travaux antérieurs à ce travail de recherche, dans le même domaine d'application. Il comprend également un résumé technique et concis des différents concepts rencontrés dans l'étude réalisée et spécifiques à celle-ci. Je vais donc expliciter les concepts de cycle de vie, d'analyse de cycle de vie, de coût du cycle de vie et enfin le concept de bâtiment passif.

Synthétique et abordable, cet état de l'art se veut néanmoins complet et vise à rendre ce travail accessible pour tous.

Le domaine de recherche lié à cette étude est relativement récent, bien qu'en pleine expansion. Je n'établis donc pas de résumés d'études similaires par manque de points de comparaison. Les articles, les travaux et les documents rencontrés lors de ma recherche ont majoritairement pour but de traiter le sujet de l'analyse de cycle de vie relative à un ou quelques matériaux en particulier. Peu d'études s'intéressent aux bâtiments dans leur intégralité. Encore moins de recherches en étudient plusieurs avec des paramètres similaires afin de les comparer.

Quelques travaux antérieurs ont néanmoins attiré mon attention dans ce domaine.

Churkina et son équipe de recherche se sont intéressés à l'utilisation de biosourcés tels que le bois massif afin de limiter les émissions dues à la production de matériaux de construction plus courant comme le béton ou l'acier dont le procédé de fabrication est basé sur l'extraction de minéraux, et par la même occasion de permettre aux futures constructions de stocker du carbone, à long terme, au sein de leurs matériaux (Churkina et al., 2020).

Anderson et Moncaster ont également travaillé sur ce même type de sujet de recherche, en se concentrant de manière plus précise sur la contribution environnementale du ciment lors de nouvelles constructions (Anderson & Moncaster, 2020). Elles ont via cette étude défini de nouvelles fiches EPD sur les ciments et bétons, tout en démontrant l'intérêt de réduire leur utilisation dans les constructions futures afin de baisser les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de la construction.

Outre ces études concentrées sur le ciment, le SBD Lab a réalisé plusieurs études comparatives entre des bâtiments NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) construits de manière traditionnelle, via une combinaison de béton, d'isolants pétrochimiques et de briques cuites, et d'autres construits à base de matériaux biosourcés tels que le chanvre et le bois (Gauvreau-Lemelin & Attia, 2017).

D'autres livres et articles s'intéressent plus à la circularité des matériaux dans le secteur de la construction. Attia développe notamment ce sujet dans son livre *Regenerative and positive impact architecture : Learning from case studies* (Attia, 2018b).

Attia compare aussi des bâtiments dans leur globalité selon différents critères et via plusieurs méthodes. Cette démarche est notamment entreprise par rapport à quatre bâtiments aux États-Unis, en Suisse, et aux Pays-Bas. (Attia, 2018a) Cette comparaison intègre le processus d'analyse de cycle de vie de manière précise et complète et les résultats de ce travail sont émis notamment au travers des indicateurs d'ACV tels la consommation en énergie primaire et le potentiel de réchauffement climatique, deux indicateurs également utilisés afin d'exposer les résultats de ce mémoire.

## 2.1 CYCLE DE VIE

Le concept de cycle de vie des matériaux ou des produits utilisés dans le domaine de la construction reprend l'ensemble des phases de vie de ces matériaux, depuis l'état naturel de leurs constituants jusqu'à la fin de vie du bâtiment et au retour à la nature de ceux-ci (Hoyet, 2017).

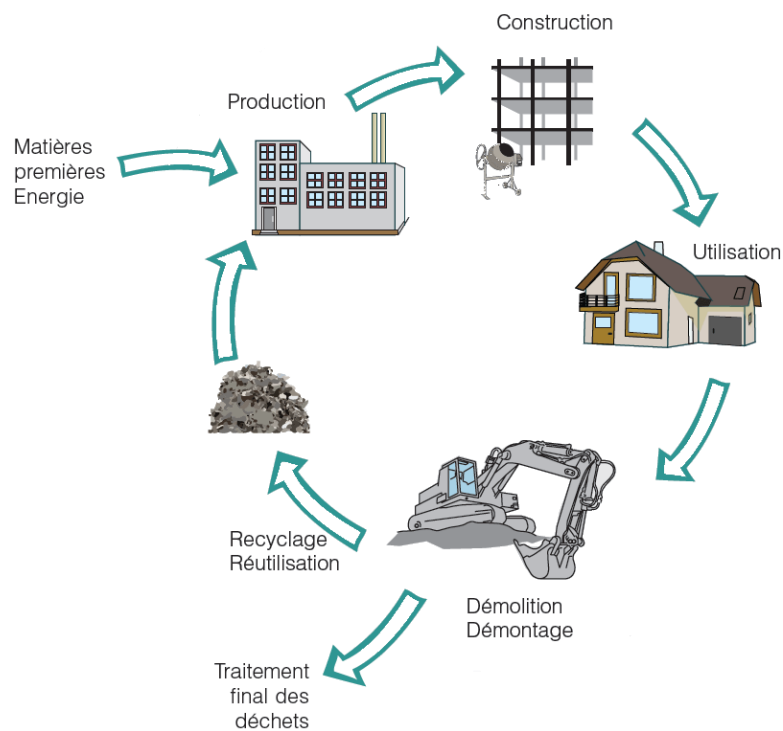


Figure 2-1 Les différentes phases du cycle de vie. (Janssen et al., 2013)

Un cycle de vie comporte quatre grandes phases :

<b>Production</b>	fabrication en usine, transport depuis les zones d'extraction, traitement
<b>Construction</b>	mise en œuvre, transport au chantier
<b>Utilisation</b>	consommation d'eau et d'énergie, nettoyage, maintenance, réparation et remplacement
<b>Fin de vie</b>	démontage ou démolition pour recyclage, réutilisation ou destruction

Figure 2-2 phases du cycle de vie (Hoyet, 2017; Janssen et al., 2013)

À ces quatre phases, on peut ajouter une phase 0, qui correspond à l'extraction des matières premières et qui peut être comptée indépendamment de la phase de production.

## 2.2 ANALYSE DE CYCLE DE VIE D'UN BÂTIMENT

Selon le CSTC, le Centre Scientifique et Technique de la Construction en Belgique, « [u]ne analyse du cycle de vie [(ACV)] ou LCA (Life Cycle Assessment) est une technique permettant de quantifier l'impact d'un produit, d'un élément de construction ou d'un bâtiment sur l'environnement tout au long de sa vie. » (Janssen et al., 2013; Reiter, 2010).

Une analyse de cycle de vie doit respecter certains principes de base, décrits dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. En complément de ces normes ISO viennent des normes européennes spécifiques à l'évaluation environnementale des bâtiments et des produits de construction en général. (Janssen et al., 2013) Selon la norme ISO 14040, une ACV s'exécute en quatre phases (ISO 14040, 2006). Selon cette même norme, on peut définir les relations entre ces différentes phases (Figure 2-3).

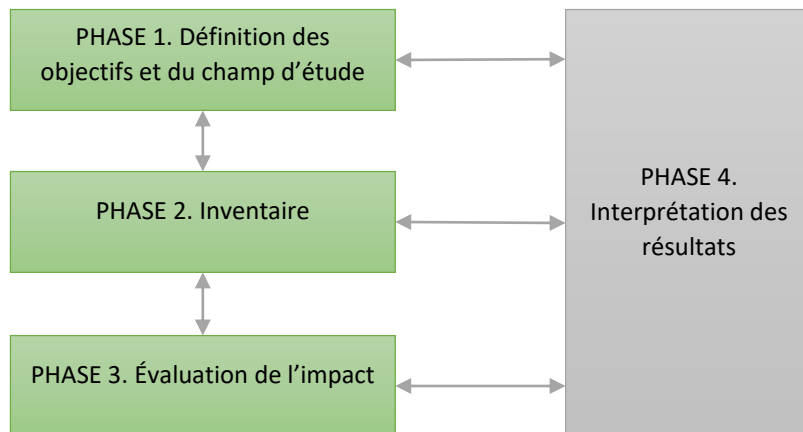


Figure 2-3 Phases de l'analyse de cycle de vie

### 2.2.1 Objectif et champ d'étude d'une ACV

L'**objectif** de l'ACV regroupe le questionnement à l'origine de la démarche d'ACV ainsi qu'une description de l'utilisation envisagée des résultats et du public concerné.

Le **champ d'étude** décrit de manière transparente le système étudié, ainsi que les phases de cycle de vie qui le concernent (Janssen et al., 2013) (Figure 2-4).



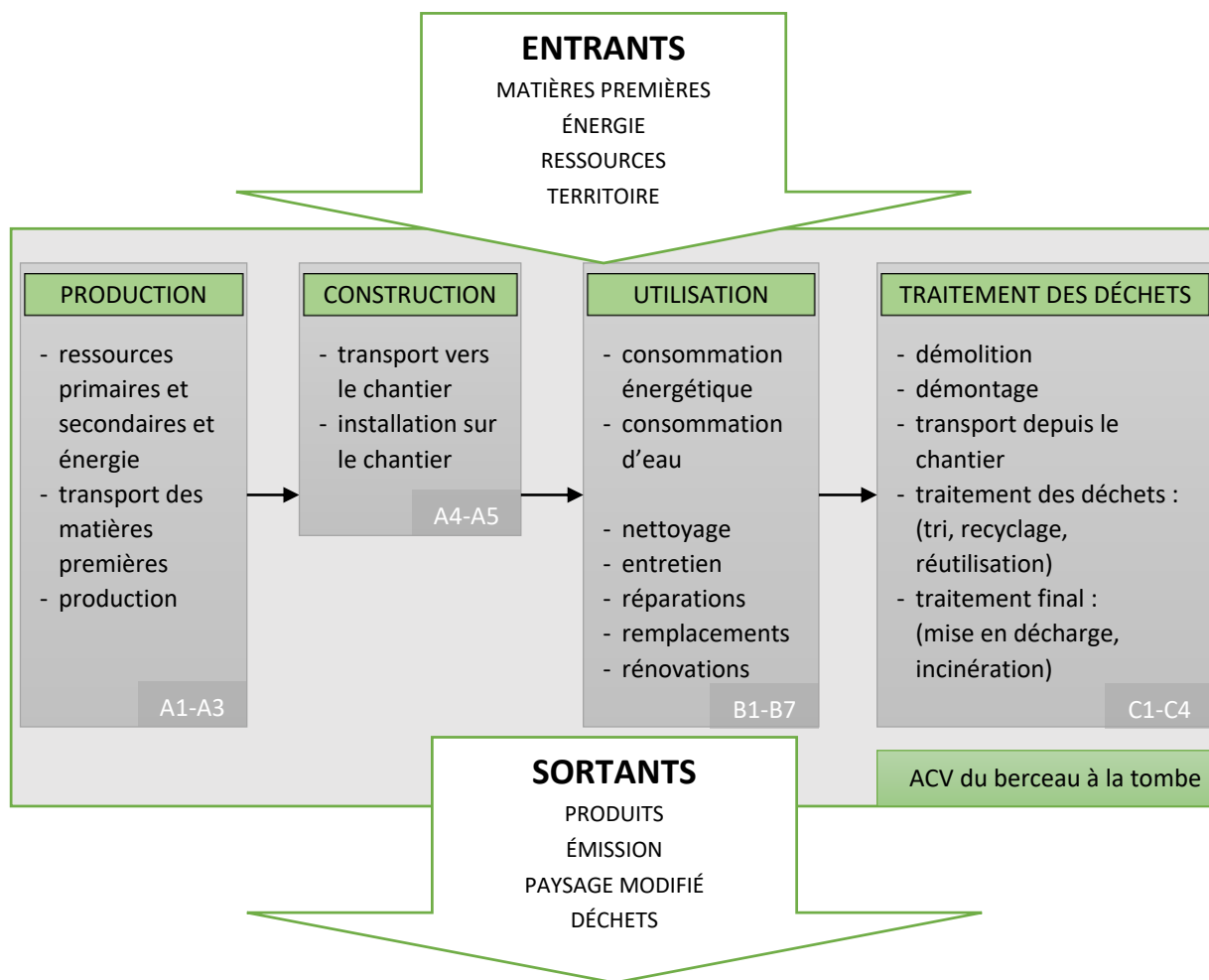


Figure 2-4 Phases et processus d'analyse de cycle de vie d'un matériau, produit de construction ou bâtiment

La norme européenne (NBN EN 15804) différencie trois types d'ACV, se limitant à différentes phases. Dans le cadre de ce mémoire et donc d'une analyse d'un bâtiment entier, une analyse « du berceau à la tombe » (*cradle-to-grave*) est obligatoire. Ce type d'ACV tient compte de toutes les phases du cycle de vie. (Janssen et al., 2013)

L'**unité fonctionnelle** d'une ACV définit les exigences spécifiques au cas d'étude, que ce soit à l'échelle du produit (bois, béton, acier, etc.), de l'élément (mur, façade rideau, plancher, etc.) ou du bâtiment entier. L'unité fonctionnelle est le bâtiment entier dans le cadre de ce travail (Attia, 2018b; Reiter, 2010).

L'**inventaire de cycle de vie** est composé de bases de données regroupant des processus spécifiques aux matériaux et aux produits de construction.

### 2.2.2 Analyse de l'inventaire d'une ACV

La deuxième étape d'une analyse de cycle de vie est une phase d'analyse de l'inventaire défini plus tôt, et de récolte des données détaillées nécessaires à l'exécution de l'ACV.

Il est nécessaire de diviser le système étudié en une série de processus (correspondant dans le cadre de ce travail à la production des matériaux de construction, à l'utilisation du

bâtiment, etc.) et de phases. Les flux entrants et sortants visibles à la Figure 2-4 sont alors qualifiés et quantifiés pour chacun de ces processus. On définit par exemple, pour le transport d'un matériau spécifique de l'usine au chantier : le moyen de transport, la distance et le degré de chargement. (Janssen et al., 2013)

Les quantités des flux entrants et sortants imputées dans cette phase sont, dans le cadre de ce travail de recherche, déterminés au moyen des modélisations BIM (*Building Information Modelling*) des différentes configurations d'étude.

### 2.2.3 Évaluation de l'impact d'ACV

La phase d'**analyse de l'impact de cycle de vie** découle de la phase d'inventaire et est réalisée à partir de celui-ci. Cette étape a pour objectif de quantifier la contribution de chacun des produits ou matériaux considérés dans l'ACV à différentes catégories d'impacts environnementaux. (Janssen et al., 2013)

Les indicateurs d'impacts environnementaux principaux sont repris dans la liste ci-dessous. Les indicateurs pris en compte dans le cadre de ce travail sont formatés en gras. Ils ont été sélectionnés pour répondre au mieux aux questionnements de ce travail de recherche, liés pour leur majeure partie au réchauffement climatique, à la consommation énergétique en général et à la conservation de l'environnement actuel (terrestre et aquatique).

- **Changement climatique, gaz à effet de serre (kg CO<sub>2</sub> équivalent)**
- Destruction de la couche d'ozone stratosphérique (kg CFC 11 équivalent)
- **Acidification terrestre et aquatique (kg SO<sub>2</sub> équivalent)**
- **Eutrophisation (kg PO<sub>4</sub> équivalent)**
- Formation d'ozone photochimique (kg éthène équivalent)
- Épuisement des ressources abiotiques, minéraux (kg Sb équivalent)
- Épuisement des ressources abiotiques, ressources fossiles (MJ)
- **Consommation en énergie primaire (MJ)**

À cette liste principale peuvent être ajoutées des catégories d'impacts de second ordre, telles la formation de matières particulaires, la radiation ionisante, la toxicité humaine écotoxicité terrestre ou aquatique (eau douce ou marine), l'occupation du territoire agricole ou urbain, et la transformation du territoire naturel.

L'épuisement des ressources abiotiques, minérales comme fossiles aurait également été un critère de choix dans le cadre de ce travail, mais n'est pas pris en compte dans le cadre de ce travail pour des raisons de temps à disposition. Une étude similaire comprenant l'ensemble des indicateurs d'ACV pourrait faire suite à ce mémoire dans le cadre d'une recherche de doctorat par exemple.

En combinant plusieurs de ces indicateurs individuels, on peut dresser le **profil environnemental** du produit, du matériau ou du bâtiment étudié.

Dans un second temps, la normalisation, le regroupement et la pondération de ces indicateurs permettent d'exprimer les résultats des indicateurs individuels sous un score

chiffré. Cette méthode doit cependant être utilisée avec prudence, et ses résultats analysés de manière subjective. (Janssen et al., 2013)

Cette méthode d'évaluation ne sera pas utilisée dans le cadre de ce travail. Les différents indicateurs étudiés seront toujours exposés avec des résultats juxtaposés pour plus de clarté de ceux-ci.

## 2.2.4 Interprétation des résultats de l'ACV

Les résultats d'une ACV soulèvent souvent des questions en même temps que d'y répondre. C'est pour cette raison que ces résultats doivent être discutés et interprétés en diverses étapes : l'identification des points significatifs, la vérification de la sensibilité et de la cohérence et, enfin, les conclusions et les recommandations. (Janssen et al., 2013).

## 2.3 COÛT DU CYCLE DE VIE D'UN BÂTIMENT

Le coût de cycle de vie d'un bâtiment est une méthode d'analyse permettant l'évaluation comparative du coût global relatif à un projet de construction. Cette analyse prend en compte l'ensemble des facteurs économiques pertinents, immédiats ou opérationnels. Cette méthode est soumise à la norme ISO 15686-5.

Dans le cadre de ce travail, divers types de coûts interviennent (ISO 15686, 2011; Simonen, 2014):

- les coûts de construction ;
- les coûts de maintenance et de remplacement d'éléments de construction ;
- les coûts d'utilisation des bâtiments ;
- les coûts de démolition en fin de vie des matériaux ou du bâtiment.

L'intérêt de ce type d'étude de coûts est l'estimation du prix de revient du bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie afin de minimiser celui-ci. Un bâtiment passif, plus cher à la construction, pourra se révéler rentable à long terme via une méthode de calcul du coût global de par ses faibles coûts d'utilisation par exemple. (PMP asbl, 2019)

### 2.3.1 Les coûts de construction

Les coûts de construction reprennent les prix de revient des matériaux de construction ainsi que les coûts de main d'œuvre et de placement. Les coûts de transport sont également inclus dans cette catégorie.

Dans le cadre de ce travail, les coûts de construction sont repris à partir du Bordereau des prix unitaires, édition 2017. (UPA, 2017)

### 2.3.2 Les coûts de maintenance

Les coûts de maintenance interviennent lors de la remise en état ou du remplacement de certains éléments de construction tels le crépi, les membranes bitumineuses ou les menuiseries intérieures.

Le calcul de ces coûts se fait de la manière la plus défavorable possible dans le cadre de ce travail de recherche, afin de ne pas sous-évaluer les coûts de rénovation par exemple. Les coûts de maintenance, pour un matériau ou un produit donné, sont donc égaux à la somme des coûts de démolition et de construction pour le même matériau ou produit. (UPA, 2017)

### 2.3.3 Les coûts d'utilisation

Les coûts d'utilisation sont repris via trois sources d'énergie : l'électricité pour la consommation en électricité de tous les jours et le refroidissement, le mazout pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire des quatre premières configurations d'étude, et enfin des

panneaux solaires thermiques et photovoltaïques pour la production des deux dernières configurations d'étude.

Pour une estimation optimale de ces coûts, une moyenne des prix, sur les « x » dernières années en fonction des sources disponibles, a été effectuée.

### *Prix de l'électricité*

La Figure 2-5 montre l'évolution du prix de l'électricité en Belgique depuis 2008 pour des petits consommateurs.

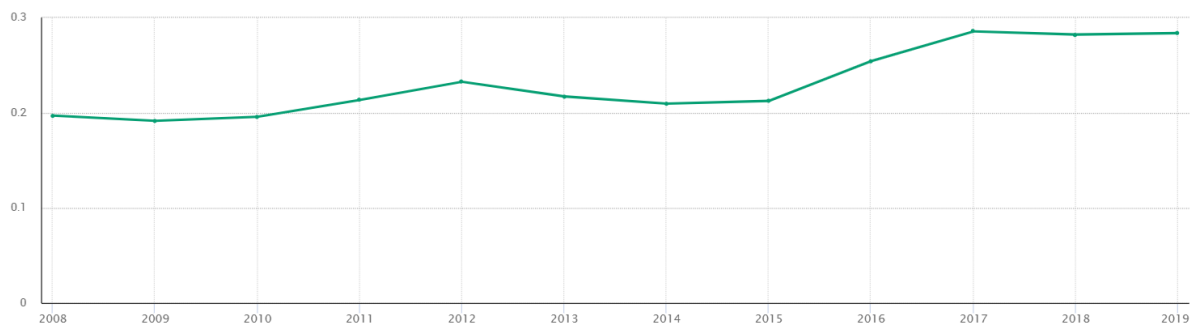


Figure 2-5 Évolution du prix de l'électricité pour des petits consommateurs en Belgique entre 2008 et 2019 (Eurostat, 2020)

Année	2015	2016	2017	2018	2019
Prix (€/kWh)	0,2126	0,2544	0,2857	0,2824	0,2839

Tableau 2-1 Prix de l'électricité en Belgique entre 2015 et 2019 (Eurostat, 2020)

En effectuant une moyenne des prix entre 2015 et 2019, on arrive à une valeur de **0,2638 €/kWh** dans le cadre d'une consommation en Belgique dans le secteur non résidentiel de petite taille, assimilé en terme de consommation à un usage résidentiel.

### *Prix du mazout (gasoil diesel de chauffage)*

Les prix du mazout de chauffage considérés sont d'application pour des commandes excédant 2000 L, ce qui correspond à la taille du bâtiment étudié.

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Prix (€/L)	0,8837	0,8186	0,6095	0,5089	0,5942	0,7104	0,7019	0,5144

Tableau 2-2 Prix du mazout de chauffage en Belgique entre 2013 et 2020 (Statbel, 2020)

En effectuant une moyenne des prix au litre entre 2013 et 2020, on arrive à une valeur de 0,667 €/L. Sachant que 1 L de gasoil diesel de chauffage a un pouvoir calorifique de 10,648 kWh, on obtient finalement un prix moyen de **0,0627 €/kWh** dans le cadre d'une consommation en Belgique (Informazout, 2017).

### *Prix des panneaux solaires*

Une méthode alternative afin de subvenir aux besoins en énergie du bâtiment est l'utilisation de panneaux solaires photovoltaïques pour la production d'électricité, et thermiques pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage.

Le prix de panneaux solaires varie fortement d'un fabricant à l'autre, une moyenne sera donc utilisée entre les valeurs basses et hautes des prix du marché (Tableau 2-3).

Prix au m <sup>2</sup> (€)	Min	Max	Moyen	Placement	Total/m <sup>2</sup>
Panneau solaire photovoltaïque	200	300	250	125	375
Panneau solaire thermique	200	400	300	150	450

Tableau 2-3 Prix des panneaux solaires (PrixTravauxm<sup>2</sup>.com, 2020)

Les prix considérés dans le cadre de ce travail seront donc **375 €/m<sup>2</sup>** pour des panneaux solaires photovoltaïques et de **450 €/m<sup>2</sup>** pour des panneaux solaires thermiques. Dans les deux cas, on prévoit de remplacer les panneaux tous les 25 ans.

### 2.3.4 Les coûts de fin de vie

Les coûts de fin de vie représentent les coûts de déconstruction ou de démolition, puis de recyclage des différents matériaux et éléments de construction présents dans un bâtiment.

Dans le cadre de ce travail, les coûts de construction sont, comme les coûts de construction, repris à partir du Bordereau des prix unitaires, édition 2017. (UPA, 2017)

## 2.4 BÂTIMENT PASSIF

Un bâtiment passif se définit concrètement comme un bâtiment qui n'a pas besoin de système de chauffage centralisé. Un préchauffage de l'air entrant est censé être suffisante. Il se caractérise par une consommation énergétique en moyenne quatre fois moindre que pour un bâtiment ordinaire. Il est moins énergivore et plus confortable qu'un bâtiment traditionnel de par l'absence de courants d'air et la meilleure isolation acoustique (PMP asbl, 2019).

Un bâtiment passif regroupe quelques caractéristiques qu'un bâtiment standard ne présente pas. Il est étanche à l'air et possède une épaisse couche isolante. On favorise aussi des châssis en triple vitrage et une installation d'une ventilation mécaniquement contrôlée (VMC) (PMP asbl, 2019).

Concrètement, le besoin en énergie de chauffage doit être inférieur ou égal à **15 kWh/(m<sup>2</sup>an)**, et il en va de même pour le besoin net en énergie de refroidissement dans le cas des bâtiments tertiaires. Le temps de surchauffe (>25°C) dans le bâtiment doit être inférieur à 5% (PMP asbl, 2019). Tous ces principes sont repris sous une liste de critères, et soumis à des normes. Le respect de ces normes donne accès à trois labels de certification (Figure 2-6) :

- un label passif **CLASSIQUE** qui, outre les critères de base du passif exigés depuis 20 ans, intégrera une notion de consommation en énergie primaire renouvelable limitée ;
- un label passif **PLUS**, plus exigeant sur cette notion de consommation d'énergie primaire renouvelable mais aussi nécessitant une compensation par autoproduction d'énergie renouvelable qui ça sera notre définition du « zéro-énergie » ;
- un label passif **PREMIUM**, encore plus exigeant sur ces deux critères et donc visant à produire plus que ce que l'on ne consomme. C'est notre vision du bâtiment de demain, à énergie « positive ».





LABELS	BNE [kWh/m <sup>2</sup> .an]	Étanchéité [vol/h]	Surchauffe [%]	Consommation d'EPR <sup>1</sup> [kWh/m <sup>2</sup> <sub>SRT</sub> .an]	Production d'EPR <sup>2</sup> [kWh/m <sup>2</sup> <sub>SD</sub> .an]
	≤ 15	≤ 0,6	≤ 5	≤ 60	-
				≤ 45	≥ 60
				≤ 30	≥ 120
	≤ 25	≤ 1*	≤ 5	≤ 80	-

Figure 2-6 Labels passifs

En complément des trois labels applicables à des nouvelles constructions vient un label passif **DE RÉNOVATION**.

Deux labels sont considérés dans le cadre de ce travail : le label passif de rénovation pour les configurations d'étude 3 et 4 et le label passif plus pour les configurations d'étude 5 et 6. Ces différentes configurations seront détaillées dans les chapitres suivants. Un résumé de ces labels est disponible dans l'Annexe I.

# 3

## MÉTHODOLOGIE

### 3.1 PROCESSUS DU TRAVAIL

Le but de ce travail, comme expliqué dans l'introduction, est de continuer à diminuer la consommation énergétique du secteur de la construction, et du secteur tertiaire en particulier. Cette problématique s'inscrit dans un mouvement plus global, planétaire, de prise de conscience de l'impact de l'homme et de ce qu'il construit sur son environnement. De ce fait, le but de cette recherche est de déterminer à quel point et à partir de quelles conditions il est préférable de rénover ou de reconstruire un bâtiment tertiaire, pour la planète d'un point de vue environnemental comme pour son propriétaire d'un point de vue financier.

L'ensemble de la méthodologie suivie tout au long de ce travail est destinée à une approche comparative des résultats d'analyse de cycle de vie. La véracité des résultats obtenus, et leur précision individuelle pour chaque configuration, a de ce fait un impact relativement limité sur les résultats. La sensibilité des résultats comparatifs relative à chacun des paramètres d'entrée est également réduite via cette approche comparative, et a fortiori lors de la comparaison de deux configurations du bâtiment d'étude similaires.

Les grandes lignes du processus de recherche peuvent être résumées par la Figure 3-1:

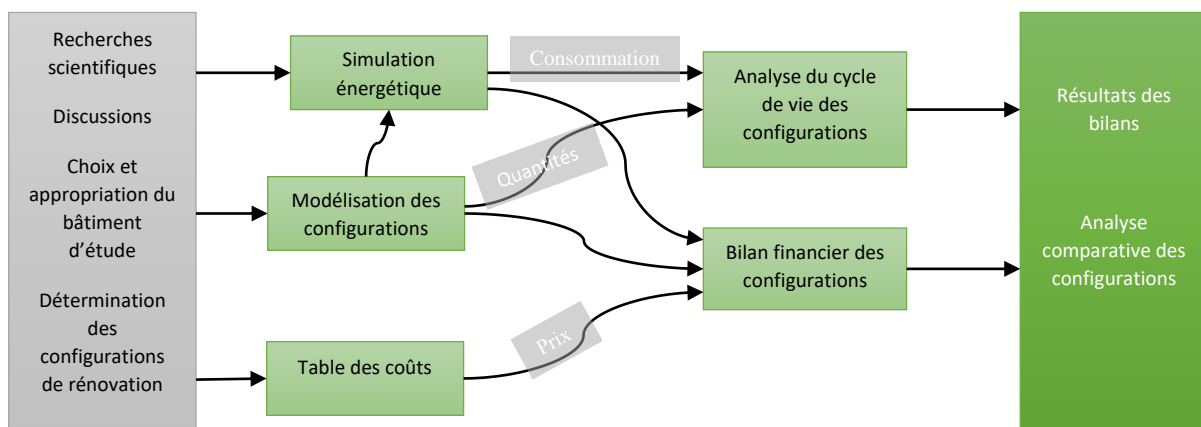


Figure 3-1 Processus du travail – schéma explicatif

Dans un premier temps, il est nécessaire de rassembler des informations relatives à des travaux similaires ayant déjà été effectués, aux différentes notions qui vont être rencontrées durant le travail, et aux normes et moyens de calcul existants et nécessaires au cheminement



du travail. Cette première étape fut majoritairement effectuée en partenariat avec mon promoteur Monsieur Shady Attia, qui m’a aiguillé vers mon sujet final.

Cette phase a également permis de déterminer le type de méthodologie à appliquer dans le cadre de ce mémoire. La méthode mise en œuvre est ici une méthode de recherche expérimentale quantitative, dont le but est de répondre à une question pratique. On peut donc également considérer ce travail comme une recherche appliquée.

Dans un second temps vient le choix du cas d’étude. L’objectif est de sélectionner un bâtiment de type tertiaire afin de se différencier des études déjà effectuées en Wallonie sur des bâtiments résidentiels. Le choix définitif du bâtiment a été réalisé à la suite de diverses propositions de Madame Muriel Brandt, responsable du bureau d’étude et de conseil *Écorce* à Liège. L’idée initiale du travail était de traiter différents bâtiments comme cas d’étude à comparer, mais pour permettre l’étude de scénarios multiples, la recherche sera effectuée sur différentes configurations d’un même bâtiment d’étude, également discutées avec Madame Muriel Brandt.

Comme on peut le voir sur la Figure 3-2, le cœur du travail à proprement parler est ensuite divisé en deux grandes phases.

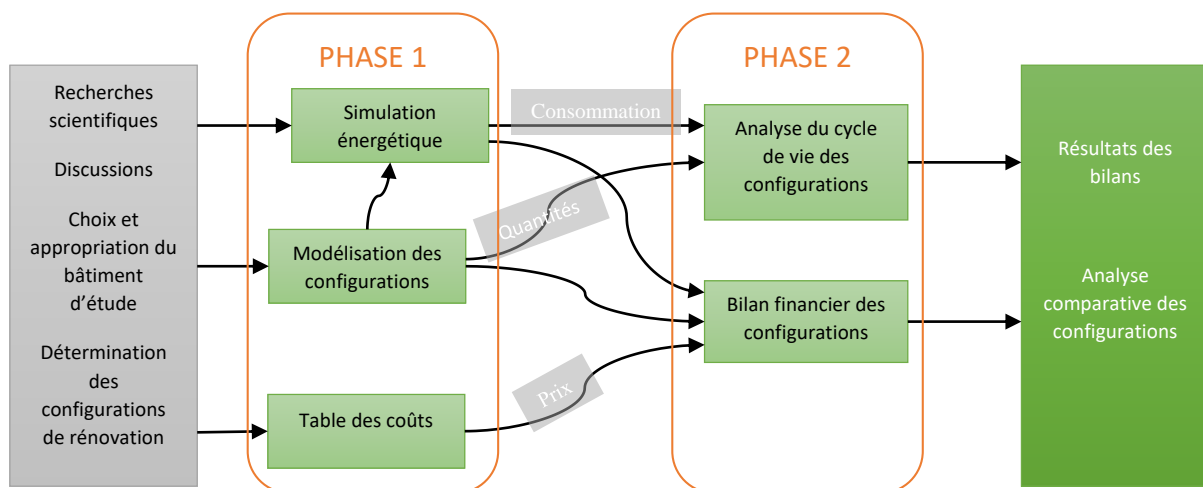


Figure 3-2 Processus du travail – découpe du travail en phases

La PHASE 1 est une phase de préparation des bilans. Elle est constituée de 3 parties :

- la modélisation des différentes configurations du bâtiment d’étude qui permet de déterminer les quantités de matériaux utilisées lors de la construction ;
- la simulation énergétique (statique, via le logiciel *PHPP*) de chacune des configurations qui permet de déterminer la consommation du bâtiment et de vérifier le respect des normes de bâtiment passif ;
- l’établissement des prix de construction, de remplacement et de démolition de chaque ressource ou matériau utilisé.

La PHASE 2 est la phase principale du travail de recherche. Elle est constituée de 2 parties :

- l’analyse de cycle de vie de l’ensemble du bâtiment pour chaque configuration ;

- le bilan financier du coût de rénovation ou reconstruction ainsi que de fonctionnement du bâtiment.

Dans un troisième et dernier temps, viennent les résultats des analyses de cycle de vie et des bilans financiers relatifs à chacune des configurations de rénovation ou de reconstruction du bâtiment d'étude. Ces résultats permettent alors d'effectuer une analyse comparative entre chacune de ces configurations, et de déterminer laquelle est optimum en fonction des attentes et des conditions de départ.

La durée de vie des bâtiments sera dans un premier temps évaluée à 50 ans sans rencontrer le besoin de rénover, de réparer ou de remplacer les éléments principaux de sa construction. Il s'agit de la valeur définie par l'Eurocode 0 pour les calculs de structure (Janssen et al., 2013; Méquignon, 2012).

Une seconde partie de l'analyse des résultats se penchera sur une durée de vie de 100 et 150 ans, qui représentent la durée de vie estimée actuellement des matériaux structurels des bâtiments en ossature bois et béton dans des conditions standard ou bonnes (Attia, 2019; Méquignon, 2012) (Figure 3-3).

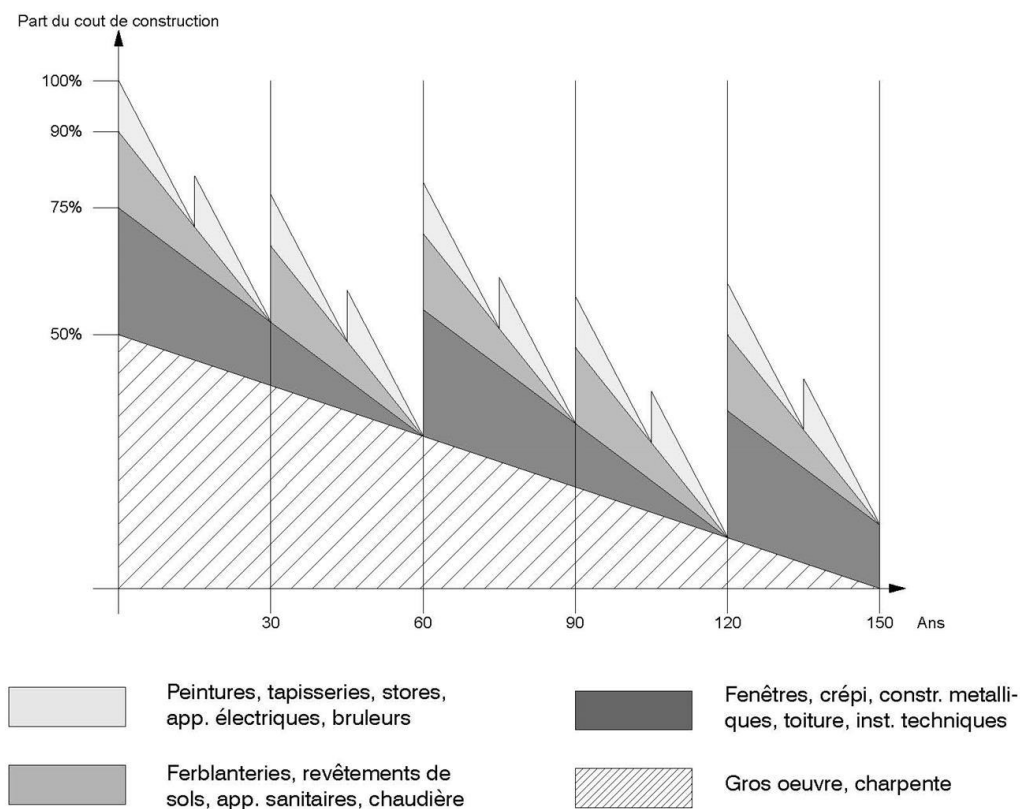


Figure 3-3 Durée de vie d'éléments de construction (Attia, 2019)

Un contrôle itératif de la sensibilité des paramètres d'entrée principaux vient compléter la méthodologie de travail de ce mémoire. (ISO 14040, 2006) Cette analyse de sensibilité prend place à la fois dans la PHASE 1 (Figure 3-2) lors de la simulation énergétique des différentes configurations, au sein du logiciel *PHPP*, et dans la PHASE 2 (Figure 3-2) lors de l'analyse de cycle de vie de ces mêmes configurations, au sein du logiciel *One Click LCA*.

## 3.2 LOGICIELS ET BASES DE DONNÉES

Ce travail a été réalisé avec différents logiciels en fonction des besoins.

Les modélisations du bâtiment initial existant puis des différentes configurations d'étude ont été réalisées au moyen du logiciel de DAO *Autodesk REVIT*. C'est un outil qui permet de dessiner directement en trois dimensions les éléments de construction, de leur attribuer des caractéristiques propres et de visualiser son travail en plans, coupes et vues 3D. *REVIT* est ce que l'on appelle un logiciel BIM (Building Information Modelling). Ce type de modélisation permet d'obtenir de manière directe l'ensemble des quantités de matériaux de construction utilisées dans la maquette de bâtiment sans avoir à tout calculer élément par élément.

Les simulations énergétiques « statiques » des différentes configurations d'étude ont été réalisées au moyen du logiciel PHPP (Passive House Planning Package) dans sa version 8,5.

Les études d'analyse de cycle de vie des différentes configurations d'étude ont été réalisées au moyen du logiciel *One Click LCA*, développé par *Bionova Ltd* et accessible en licence étudiant pour les outils basiques d'ACV. Il est important de notifier que *One Click LCA* respecte la norme ISO 14040 dans ses calculs d'analyse de cycle de vie des bâtiments. Le certificat de ce logiciel peut être trouvé dans l'Annexe II. Les intérêts de ce logiciel sont multiples. Un premier intérêt est la possibilité de télécharger directement une maquette BIM sur le site et de commencer directement l'analyse en vérifiant au préalable la bonne conversion des différents matériaux. Un second intérêt est le fait que le calcul se fait en ligne. Un troisième intérêt, et certainement le plus important, est l'accès à une grande base de données de fiches et caractéristiques environnementales de matériaux de construction. On retrouve dans cette base de données des matériaux de fabricants spécifiques à certains pays, mais également des valeurs pour des matériaux génériques relatifs au pays dans lequel on référence le projet. Parmi les bases de données utilisées, on retrouve *Ecoinvent* et *GaBi*, respectant toutes deux la norme EN 15804 pour les informations de produits.

La majeure partie du travail de calcul, d'analyse de cycle de vie, d'étude de coûts, de simulation énergétique, de comparaison et de création de graphiques a été effectuée via le logiciel *Microsoft Excel 2016*.

### 3.3 HYPOTHÈSES ET CHOIX DE TRAVAIL

Concernant le bâtiment d'étude, les plans de ce dernier ont été légèrement modifiés au niveau de son sas d'entrée au rez-de-chaussée, afin d'obtenir un bâtiment plus régulier et d'éliminer un type de composition de façade. De ce fait, j'obtiens la possibilité de travailler sur un bâtiment où les quatre façades sont identiques à l'exception d'une porte remplaçant une fenêtre du côté de l'entrée, avec une même composition de paroi pour chaque mur extérieur.

Du point de vue de l'analyse de cycle de vie des bâtiments, certaines hypothèses ont été établies afin de réaliser ce travail.

Une **première hypothèse** concerne le choix des phases de l'analyse de cycle de vie à prendre en compte dans les calculs (Figure 3-4).

LIMITES DU SYSTÈME D'ÉTUDE D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE																
Production			Construction		Utilisation							Fin de vie				Bénéfices au-delà de la limite du système
Approvisionnement en matières premières	Transport	Fabrication	Transport vers le chantier	Construction	Utilisation	Maintenance	Réparation	Remplacement	Rénovation	Utilisation d'énergie opérationnelle	Utilisation d'eau opérationnelle	Déconstruction, démolition	Transport	Traitement des déchets	Élimination	Réutilisation Récupération Recyclage
<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	A5	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3</b>	<b>B4</b>	<b>B5</b>	<b>B6</b>	B7	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	D

Figure 3-4 Phases de l'analyse de cycle de vie prises en compte dans les calculs

L'ACV se fait du berceau à la tombe, incluant donc a priori l'ensemble des phases A à C. La phase A5 de construction est mise de côté à cause de son imprévisibilité relative aux aléas de chantier ainsi qu'à sa complexité de représentation. La phase B7 de consommation d'eau opérationnelle est quant à elle négligée pour son absence d'impact sur les résultats de la recherche. Cette valeur est en effet identique pour chacune des configurations étudiées, ce qui n'impacte pas la comparaison de celles-ci, et n'a donc aucune incidence sur les résultats. La phase D ne sera pas prise en compte dans le cadre de ce travail, par manque de temps afin de traiter de manière efficace les différents scénarios de recyclage et autres réutilisations des différents matériaux.

Une **seconde hypothèse** vise à étudier les analyses de cycle de vie des différentes configurations dans un premier temps sur une période de 50 ans, valeur traditionnellement prise en compte avec la certitude de pouvoir conserver l'intégrité de la structure et des planchers d'une construction comme mentionné plus tôt dans ce chapitre, avant d'évoluer sur 100 et 150 ans.

Une **troisième hypothèse** concerne les valeurs U (coefficient de transmission thermique) des différentes parois rénovées, de principes structurels différents. J'ai fait en sorte que les valeurs U des rénovations passives et des reconstructions passives plus en construction traditionnelle et en ossature bois soient semblables deux à deux, et amènent à une consommation énergétique quasi similaire dans chacune de ces paires de cas respectivement, afin de perturber au minimum la fiabilité des résultats.

Une **quatrième hypothèse** se rapporte aux labels passifs de rénovation et de reconstruction. Les configurations existantes et de rénovation comprennent une consommation énergétique traditionnelle en mazout et en électricité du réseau public, tandis que les configurations de reconstruction sont dans l'obligation d'être équipées d'un système de production énergétique indépendant afin de respecter le label passif plus relatif aux nouvelles constructions de bâtiments tertiaires en Wallonie. Ce système de production autonome sera ici représenté par des panneaux solaires. Les bâtiments de type nouvelle construction seront également réadaptés au niveau de leur géométrie et de leurs attributs techniques en tous genres pour être thermiquement efficaces.

D'un point de vue financier, certaines hypothèses ont aussi été établies lors de la réalisation de ce travail.

Une **première hypothèse** concerne la méthode utilisée afin d'établir les coûts des éléments de construction. Le *Bordereau des prix unitaires* utilisé dans le cadre de ce travail permet de fournir des coûts représentatifs des coûts réels dans l'année précédant sa date de sortie. Cette étude réalisée en 2020 au moyen du *Bordereau* de 2017 va donc voir ses résultats financiers être légèrement plus favorables qu'ils ne devraient. Les coûts ont en effet augmenté avec l'inflation au cours de ces trois ou quatre ans, mais cette différence est minime. Aussi, le *Bordereau des prix unitaires* est un ouvrage qui donne des valeurs hautes et basses courantes des coûts des matériaux. Une moyenne entre ces deux valeurs a donc été effectuée afin de réaliser ce travail, ne représentant donc peut-être pas exactement la moyenne statistique des coûts réels. Cela ne devrait pas influencer les résultats de ce mémoire de manière significative, étant donné que les mêmes coûts et la même méthode de détermination des coûts ont été utilisés pour chacune des configurations d'étude comparées.

Une **seconde hypothèse** est en rapport assez direct avec la première. Il s'agit d'une simplification de l'évolution des coûts des matériaux et de l'énergie dans le temps par rapport à la méthode proposée par la norme ISO 15686. Pour effectuer une projection financière optimale, il faut utiliser une valeur actualisée par l'inflation des coûts initiaux pris en compte à l'année 0 de l'étude. Cela est vrai pour les coûts des matériaux comme pour les coûts d'usage. On peut cependant mettre en parallèle l'augmentation des coûts et l'inflation, l'un

compensant l'autre avec le temps dans un calcul théorique. Ainsi, l'étude financière à court, moyen, ou long terme est calculée sur une valeur de l'euro actuelle, et la valeur de revient finale est sous-évaluée de la même manière pour chaque cas, ce qui permet la comparaison sans avoir à émettre d'hypothèse ou de théorie sur l'évolution future des coûts et du taux d'inflation.

Une **troisième hypothèse** concerne le prix de l'énergie. Le bâtiment étudié est un immeuble de bureaux de petite taille, ne bénéficiant pas de remises sur le prix de l'électricité comme peuvent en avoir certaines grosses entreprises de production ou autres usines et halls. Les prix de l'électricité achetée au réseau sont donc, dans le cadre de cette étude théorique, récupérés depuis la base de données Eurostat, dans la catégorie des petits consommateurs assimilée aux consommateurs résidentiels.

# 4

## CONFIGURATIONS D'ÉTUDE

---

Ce chapitre développe de manière précise chacune des configurations du bâtiment d'étude, leurs caractéristiques et les données qui leur sont propres. Il commence par une présentation du bâtiment existant et des six configurations d'étude de rénovation ou de reconstruction qui en découlent.

Les configurations d'étude ont pour but de projeter l'étude sur les différentes solutions qui s'offrent à un industriel en quête de gain d'efficacité énergétique ou économique pour son immeuble de bureaux. Les différents cas pris en compte tendent ainsi à être réalistes d'un point de vue pratique, suivant les lois et les labels actuels, afin de constituer une base de comparaison utile lors d'une prise de décision similaire effective.

Chacun des cas d'étude est ensuite passé en revue sous différents aspects techniques : les circonstances de rénovation ou de reconstruction, la composition des parois, les performances thermiques des matériaux et enfin des parois en tant que telles. Les valeurs U présentées dans le cadre de ce travail sont calculées automatiquement via l'encodage des parois dans le logiciel *PHPP*. Les valeurs  $\lambda$  de conductivité thermique des matériaux ont été reportées soit depuis la fiche technique du fabricant pour certains matériaux isolants spécifiques, soit depuis la base de données EPBD (CSTC, 2020) , soit depuis la base de données des logiciels *PHPP* et *Autodesk Revit* directement.

## 4.1 PRÉSENTATION DU BÂTIMENT D'ÉTUDE

Le travail de recherche réalisé dans le cadre de ce mémoire se base sur un bâtiment existant dans le Brabant wallon. Il s'agit de l'extension du bâtiment Marie Curie, siège administratif de la Province du Brabant wallon à Wavre. Ce bâtiment, de par sa volumétrie et la praticité du mot, sera appelé « le cube » dans le cadre de ce travail. La Figure 4-1 montre le bâtiment dans son état actuel.



Figure 4-1 Extension du bâtiment Marie Curie à Wavre dit "le cube"

Le bâtiment se compose de deux étages dont la projection au sol forme un carré de 22m de côté pour un total de 968 m<sup>2</sup> de surface énergétique de référence. Le bâtiment est aujourd'hui occupé comme immeuble de bureaux et peut accueillir de manière confortable une trentaine de personnes.

J'ai choisi de travailler sur le cube, car il s'agit ici d'un cas de rénovation réel et de forme assez simple à traiter. Sa rénovation énergétique a été confiée au bureau d'étude et de conseil *Écorce*, à Liège, dont Muriel Brandt, la responsable, m'a proposé l'utilisation dans le cadre de ce mémoire.



## 4.2 PRÉSENTATION DES CONFIGURATIONS D'ÉTUDE

Les six différentes configurations du bâtiment d'étude de ce travail peuvent être réparties en trois grandes catégories, schématisées à la Figure 4-2.

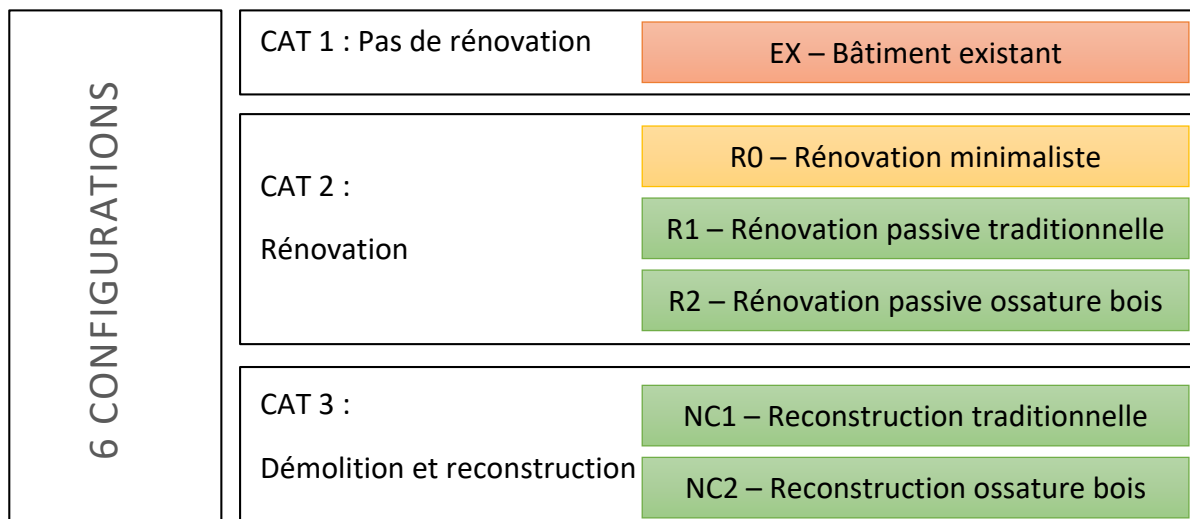


Figure 4-2 Répartition des 6 configurations d'étude

On retrouve dans une première catégorie la **configuration initiale**, sans travaux de rénovation effectués, qui servira de témoin à la comparaison des différentes configurations.

Dans une seconde catégorie viennent trois cas de rénovation. Le premier cas est une **rénovation « minimaliste »**, sans destruction majeure d'élément de construction existant, avec une isolation des murs extérieurs et de la toiture existante par l'extérieur. Les murs sont ensuite recouverts par du crépi sur l'isolant.

Le second cas est une **rénovation « passive » en construction traditionnelle**. Les murs extérieurs sont alors démolis puis reconstruits afin d'atteindre des valeurs  $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  équivalent au standard passif dans la construction. Pour rappel, la valeur  $U$  d'une paroi est l'inverse de sa résistance  $R$  au transfert de chaleur. Plus la valeur  $U$  d'une paroi est faible, plus elle est thermiquement performante.

Le troisième cas est une **rénovation « passive » en construction en ossature bois**. La valeur  $U=0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$  atteinte est alors plus faible encore que pour la construction traditionnelle, afin d'utiliser les mêmes sections de bois dans le cas de rénovation et de reconstruction en ossature bois.

Dans une troisième catégorie viennent deux cas de reconstruction optimisée. Le premier cas est une **reconstruction « passive + » en construction traditionnelle**. La structure du bâtiment reconstruit est similaire à celle du bâtiment existant, en adaptant les sections des poteaux et des poutres.

Le nouveau bâtiment se dresse sur trois étages de hauteur sous plafond légèrement inférieure à celle des deux étages existants. La surface au sol est également réduite afin de respecter la même surface utile sur trois niveaux plutôt que sur deux niveaux, ce qui augmente la compacité du bâtiment et diminue au final sa surface de déperdition pour un même volume, limitant les déperditions thermiques. Le fait de reconstruire permet également d'isoler plus efficacement la dalle de sol, en comparaison avec les cas de rénovation.

Le second cas est une **reconstruction « passive + » en construction en ossature bois** sur une dalle et des fondations en béton. Les mêmes modifications de géométries que pour le premier cas de reconstruction sont appliquées.

Dans le but de répondre au label passif plus, obligatoire à l'heure actuelle dans le cas d'une nouvelle construction d'un bâtiment tertiaire, les configurations d'étude 5 et 6 sont toutes deux équipées d'un système d'autoproduction énergétique. Ce système sera, dans le cadre de ce travail, modélisé par des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques, servant respectivement à produire de l'électricité et de l'eau chaude sanitaire et de chauffage.

Aussi, afin de profiter pleinement des possibilités qu'amène la construction d'un bâtiment neuf, les configurations 5 et 6 ont une proportion de vitrages supérieure au Nord par rapport aux trois autres façades afin de limiter les risques de surchauffe. Les nouvelles fenêtres sont également équipées de protections solaires adaptatives à la température interne, limitant presque totalement les risques de surchauffe estivale.

Cet ensemble de modifications rend certes la comparaison stricte entre les cas de rénovation et les cas de reconstruction moins aisée d'un point de vue de la recherche scientifique, mais a l'intérêt de respecter les choix que feraient un architecte en charge du projet de reconstruction en 2020 afin de rendre le nouveau bâtiment énergétiquement efficace. C'est cette approche qui est mise en avant dans le choix des différentes configurations d'étude, en partenariat avec Muriel Brandt du bureau d'ingénierie Écorce.

Les valeurs des coefficients de transmission thermique des parois (valeurs U) sont calculées avec les valeurs de résistances superficielles disponibles en Annexe III.

Les plans des rez-de-chaussée de chacune des six configurations d'étude peuvent être consultés en Annexe IV.

## 4.2.1 EX – Bâtiment existant

La première configuration d'étude (Figure 4-3) est le bâtiment existant dans son état d'origine. L'immeuble possède des fondations et une structure poteaux-poutres en béton armé. Les murs extérieurs sont composés de panneaux en béton préfabriqués de 15 cm d'épaisseur et les châssis d'origine sont en métal avec simple vitrage. La toiture plate est composée d'une structure de hourdis et d'une isolation rigide pour toiture plate de 10 cm.

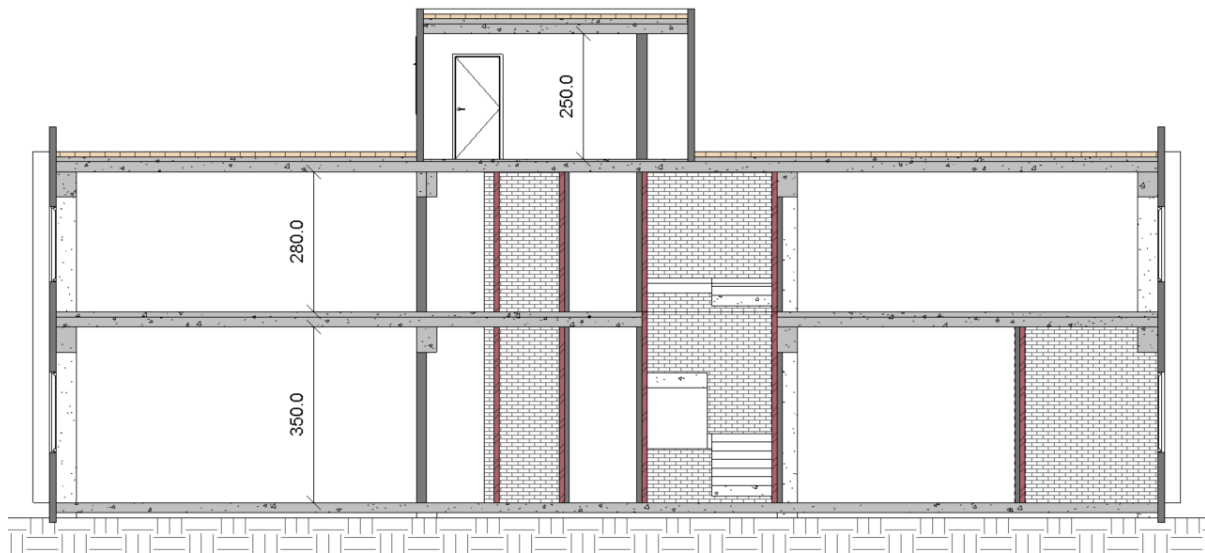


Figure 4-3 Coupe EX – Bâtiment existant

Le Tableau 4-1 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Isolant rigide	100	0,040	0,342
	Béton	100	1,046	
	Hourdis	200	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Béton	140	1,046	3,291
<i>Dalle de sol</i>	Béton	200	1,046	1,883

Tableau 4-1 Composition des parois EX – Bâtiment existant

## 4.2.2 RO – Rénovation minimaliste

La seconde configuration d'étude (Figure 4-4) a pour but d'améliorer fortement les performances thermiques du bâtiment à moindre coût, sans pour autant atteindre le standard passif. Il s'agit d'une solution de rénovation intermédiaire, à court ou moyen terme, ou encore dans le cas d'un bâtiment en fin de vie et/ou en attente de reconstruction ultérieure.

L'ensemble de la structure porteuse et des parois existantes est conservé, à l'exception des excroissances décoratives en béton visibles aux Figure 4-1 et Figure 4-3. Cela permet de placer une couche d'isolation rigide par l'extérieur sur les murs existants sans créer de pont thermique. Toujours pour rester dans l'optique de minimiser les coûts et de prévoir une rénovation à court terme, la finition de façade appliquée à cette première configuration est un crépi directement appliqué sur l'isolation rigide. Au niveau de la toiture, une couche supplémentaire de laine de roche rigide pour toiture plate de 10 cm est ajoutée. Aucune modification n'est apportée à la dalle de sol dans ce cas-ci.

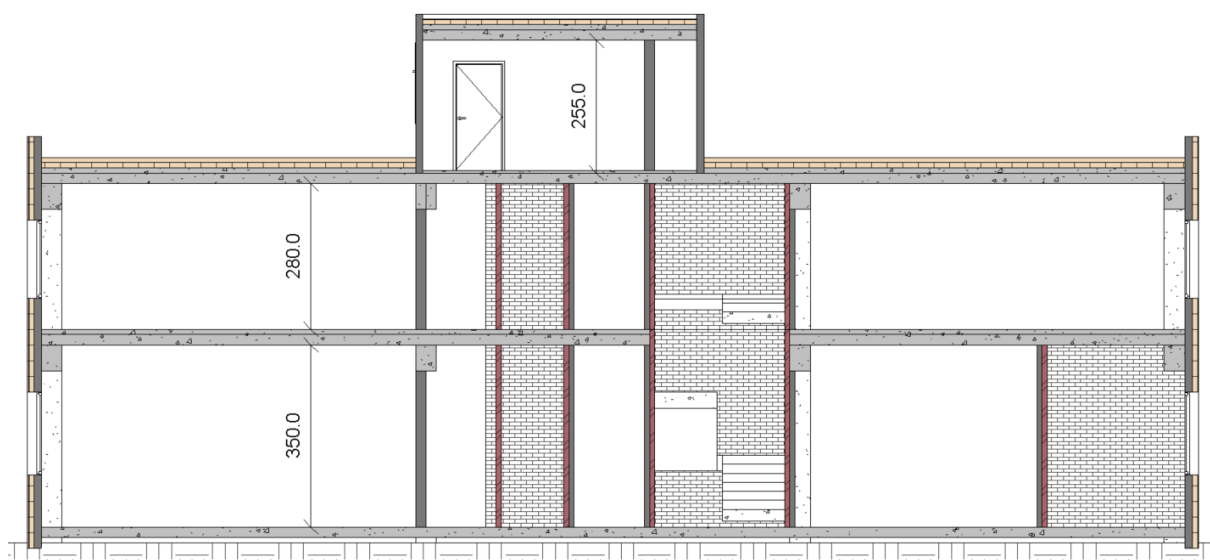


Figure 4-4 Coupe RO – Rénovation minimaliste

Le Tableau 4-2 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Laine de roche (roofboard)	100	0,039	0,187
	Isolant rigide	100	0,040	
	Béton	100	1,046	
	Hourdis	200	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Crépi (sur isolant)	25	0,72	0,289
	Isolant rigide	100	0,032	
	Béton	140	1,046	
<i>Dalle de sol</i>	Béton	200	1,046	1,883

Tableau 4-2 Composition des parois RO – Rénovation minimaliste

### 4.2.3 R1 – Rénovation traditionnelle passive

La troisième configuration d'étude (Figure 4-5) a pour but d'améliorer fortement les performances thermiques du bâtiment afin d'atteindre le standard passif. Il s'agit d'une solution de rénovation lourde, à moyen ou long terme.

L'ensemble de la structure porteuse est conservé, mais les parois entre les volumes chauffés et l'extérieur sont démolies puis reconstruites aux normes passives. En toiture, une épaisseur de 20 cm de laine de roche est ajoutée aux 10 cm existants. Les murs extérieurs sont reconstruits en construction traditionnelle (blocs de béton – isolant – briques) et les châssis sont remplacés par des fenêtres en aluminium avec triple vitrage et rupture thermique.

Au niveau de la dalle de sol, il n'existe pas de vide ventilé ou de sous-sol permettant d'isoler par en-dessous de la dalle. La solution adoptée est donc l'ajout d'une faible épaisseur (5 cm) de laine de roche acoustique pour plancher, ayant également de bonnes propriétés en tant qu'isolant thermique. Cela permet de ne recouper que les portes intérieures sans devoir les remplacer, et de conserver une hauteur sous plafond similaire à celle existante.

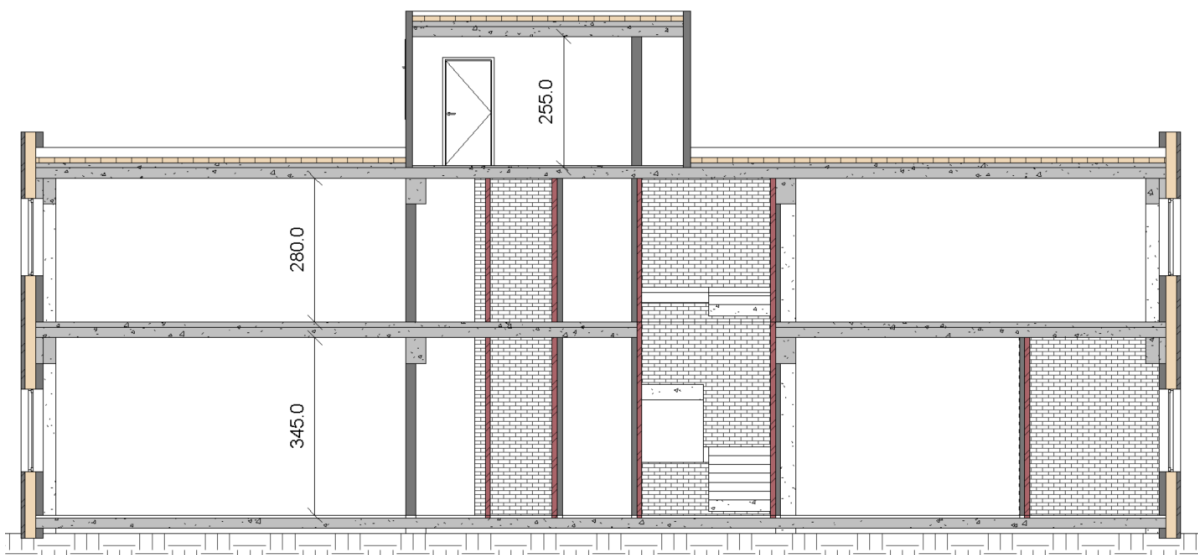


Figure 4-5 Coupe R1 – Rénovation traditionnelle passive

Le Tableau 4-3 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Laine de roche (roofboard)	200	0,039	0,124
	Isolant rigide	100	0,040	
	Béton	100	1,046	
	Hourdis	200	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Brique de parement	90	1,610	0,151
	Laine de verre	200	0,032	
	Blocs de béton	140	1,046	
<i>Dalle de sol</i>	Laine de roche (acoustique)	50	0,035	0,51
	Béton	200	1,046	

Tableau 4-3 Composition des parois R1 – Rénovation traditionnelle passive

## 4.2.4 R2 – Rénovation ossature bois passive

La quatrième configuration d'étude (Figure 4-6) a pour but, comme la troisième, d'améliorer fortement les performances thermiques du bâtiment afin d'atteindre le standard passif. Il s'agit d'une solution de rénovation lourde, à moyen ou à long terme.

L'ensemble de la structure porteuse est conservée, mais les parois entre les volumes chauffés et l'extérieur sont démolies puis reconstruites aux normes passives. En toiture, une épaisseur de 20 cm de laine de roche est ajoutée aux 10 cm existants. Les murs extérieurs sont reconstruits en ossature bois (panneaux OSB – montants en bois et isolant souple – panneaux OSB) avec une finition en brique et les châssis sont remplacés par des fenêtres en aluminium avec triple vitrage et rupture thermique.

Au niveau de la dalle de sol, la solution adoptée est identique à celle de la R1, soit l'ajout d'une faible épaisseur (5 cm) de laine de roche acoustique pour plancher, ayant également de bonnes propriétés en tant qu'isolant thermique. Cela permet de ne recouper que les portes intérieures sans devoir les remplacer, et de conserver une hauteur sous plafond similaire à celle existante.

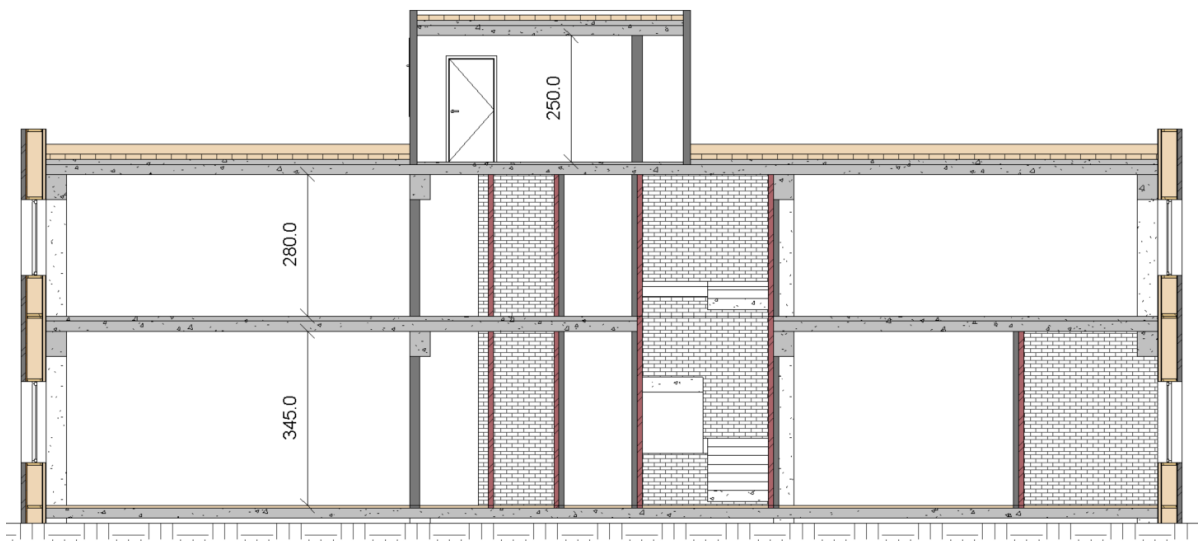


Figure 4-6 Coupe R2 – Rénovation ossature bois passive

Le Tableau 4-4 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Laine de roche (roofboard)	200	0,039	0,124
	Isolant rigide	100	0,040	
	Béton	100	1,046	
	Hourdis	200	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Brique de parement	90	1,610	0,11
	Panneau OSB	18	0,13	
	Laine de verre/ossature bois (10%)	300	0,032/0,13	
	Panneau OSB	18	0,13	
	Laine de verre/ossature bois (10%)	200	0,032/0,13	
	Panneau OSB	18	1,046	
<i>Dalle de sol</i>	Laine de roche (acoustique)	50	0,035	0,51
	Béton	200	1,046	

Tableau 4-4 Composition des parois R2 – Rénovation ossature bois passive



## 4.2.5 NC1 – Reconstruction traditionnelle passive +

La cinquième configuration d'étude (Figure 4-7) a pour but de remplacer le bâtiment existant par une nouvelle construction plus performante que le standard passif, atteignant le standard passif plus.

Le bâtiment existant est démonté et ses matériaux entrent dans leur phase de fin de vie.

Un nouveau bâtiment est ensuite construit en construction traditionnelle (blocs de béton – isolant – briques), plus compact que l'original, afin de minimiser les surfaces de déperdition en contact avec l'extérieur. Dans le cas de ce travail de recherche, la contrainte à respecter est la conservation de la surface énergétique de référence. Le nouveau bâtiment est donc construit en trois étages carrés de 17,95 m de côté au lieu de deux étages carrés de 22 m de côté. On a bien  $3 * (17,95 \text{ m})^2 = 967 \text{ m}^2 \sim 968 \text{ m}^2 = 2 * (22 \text{ m})^2$  Cette modification le rend encore plus « cubique ».

En reconstruisant, on retrouve aussi la possibilité d'isoler la dalle de sol par le dessous, ici par projection via le vide ventilé.

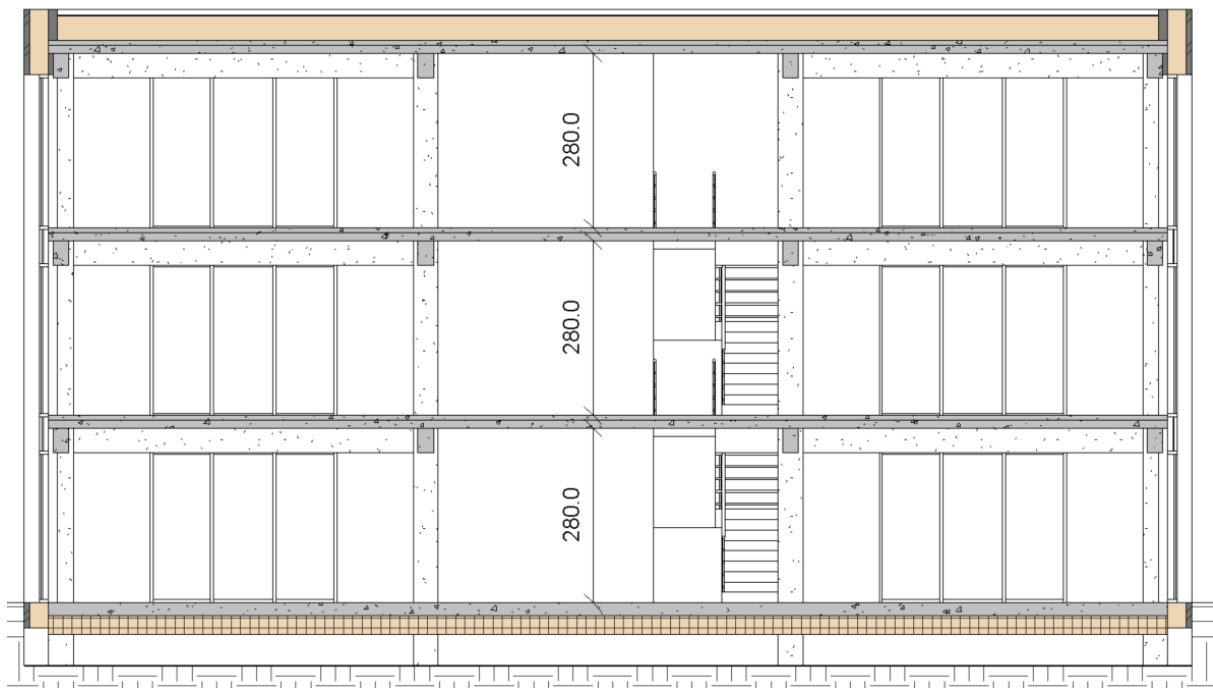


Figure 4-7 Coupe NC1 – Reconstruction traditionnelle passive +

Le Tableau 4-5 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Laine de roche (roofboard)	400	0,039	0,094
	Béton	200	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Brique de parement	90	1,610	0,103
	Laine de verre	300	0,032	
	Blocs de béton	140	1,046	
<i>Dalle de sol</i>	Béton	200	1,046	0,113
	Isolation projetée (Jetspray)	300	0,036	

Tableau 4-5 Composition des parois NC1 – Reconstruction traditionnelle passive +

## 4.2.6 NC2 – Reconstruction ossature bois passive +

La sixième configuration d'étude (Figure 4-8) a pour but de remplacer le bâtiment existant par une nouvelle construction plus performante que le standard passif, atteignant le standard passif plus.

Le bâtiment existant est démonté et ses matériaux entrent dans leur phase de fin de vie.

Un nouveau bâtiment est ensuite construit, cette fois-ci en ossature bois, autant pour la structure que pour les parois extérieures et la toiture. Seules la dalle de sol et les fondations sont en béton. Comme son homologue en construction traditionnelle, ce bâtiment se compose de trois niveaux et possède une dalle de sol isolée par le dessous.

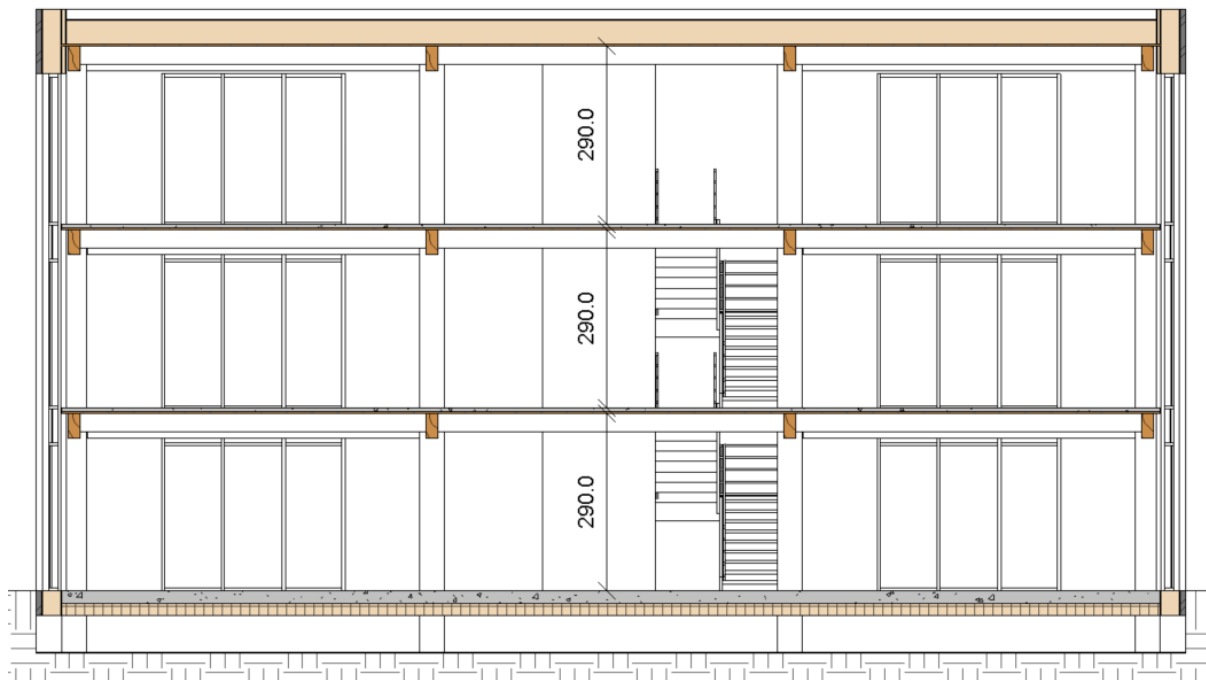


Figure 4-8 Coupe NC2 – Reconstruction ossature bois passive +

Le Tableau 4-6 reprend les différentes parois en contact avec l'extérieur ainsi que leur composition.

	Matériau	Épaisseur [mm]	$\lambda$ [W/mK]	U [W/m <sup>2</sup> K]
<i>Toiture</i>	Laine de roche (roofboard)	400	0,039	0,094
	Panneau OSB	28	1,046	
<i>Mur extérieur</i>	Brique de parement	90	1,610	0,11
	Panneau OSB	18	0,13	
	Laine de verre/ossature bois (10%)	300	0,032/0,13	
	Panneau OSB	18	0,13	
	Laine de verre/ossature bois (10%)	200	0,032/0,13	
	Panneau OSB	18	1,046	
<i>Dalle de sol</i>	Béton	200	1,046	0,113
	Isolation projetée (Jetspray)	300	0,036	

Tableau 4-6 Composition des parois NC2 – Reconstruction ossature bois passive +

## 4.3 SYNTHÈSE DES CONFIGURATIONS D'ÉTUDE

On retrouve donc six configurations d'étude, réparties en trois catégories : pas de rénovation, rénovation et reconstruction.

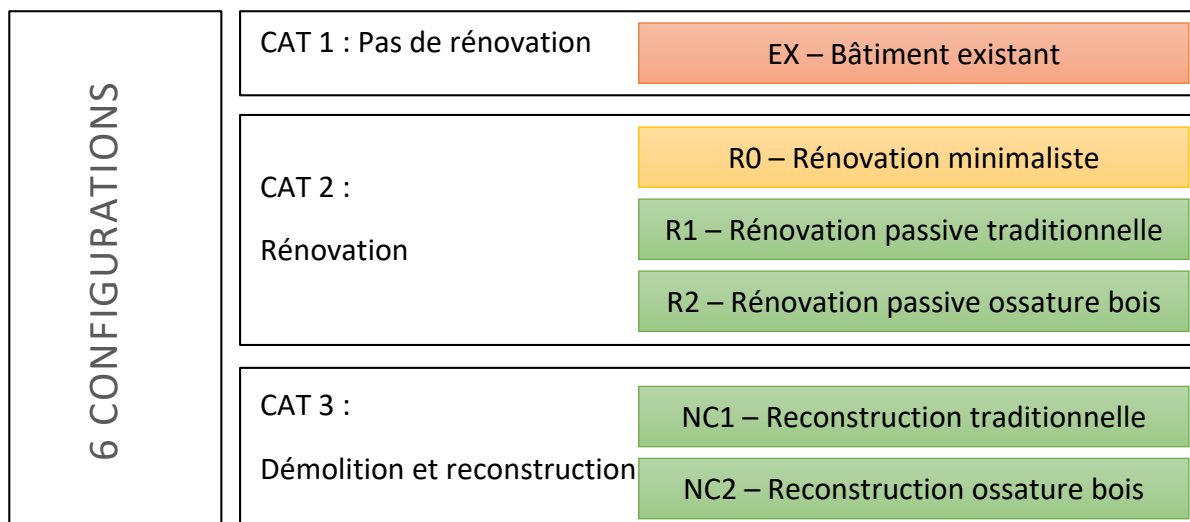


Figure 4-9 Synthèse des configurations d'étude

Le Tableau 4-7 reprend les valeurs U des parois et des fenêtres des différentes configurations utilisées dans leurs simulations énergétiques respectives.

Valeurs U [W/m <sup>2</sup> K]	EX Bâtiment existant	R0 Rénovation minimaliste	R1 Rénovation traditionnelle passive	R2 Rénovation ossature bois passive	NC1 Reconstruction traditionnelle passive+	NC2 Reconstruction ossature bois passive+
Toiture	0,342	0,187	0,124	0,124	0,094	0,094
Murs extérieurs	3,291	0,289	0,151	0,11	0,103	0,11
Dalle de sol	1,883	1,883	0,51	0,51	0,113	0,113
Fenêtres	5,83	2,29	0,86	0,86	0,67	0,67

Tableau 4-7 Valeurs U des parois

On peut remarquer la nette baisse des valeurs des coefficients de transmission thermique en allant du cas existant aux cas de reconstruction.

# 5

## ANALYSE DES CONFIGURATIONS D'ÉTUDE

---

Les différentes configurations d'étude ont maintenant été présentées. Il est temps de rentrer en profondeur dans ces versions du cube, et de parcourir les caractéristiques intrinsèques à celles-ci. Ce chapitre dévoile les résultats de l'analyse de cycle de vie des configurations d'étude sur 50 ans, et permet de répondre aux deux premières questions posées dans l'introduction.

- 1. Quels sont les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive sur l'analyse de cycle de vie d'un bâtiment tertiaire ?**
- 2. Quels sont les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive sur les coûts de cycle de vie d'un bâtiment tertiaire ?**

Pour ce faire, le chapitre est subdivisé en six parties, analysant une par une chacune des configurations d'étude. Les tableaux de quantités des matériaux utilisés ainsi que des données récapitulatives des analyses de cycle de vie et des coûts de cycle de vie sont disponibles en Annexe V. Différents aspects sont étudiés et présentés.

### *La modélisation et l'aspect extérieur*

Une perspective 3D de la modélisation du bâtiment via *Autodesk Revit* est présentée pour chaque cas, montrant l'aspect extérieur de celui-ci et rendant compte des matériaux et finitions.

### *La consommation énergétique*

Chaque configuration du cube est passée par une étude de ses performances énergétiques. Cette étude a été réalisée au moyen du logiciel PHPP, déjà mentionné plus tôt dans ce travail. Il s'agit d'une étude dite « statique », dépendant de l'environnement climatique de Wavre, et prenant en compte la composition et la disposition des différentes parois composant le bâtiment.

Pour les configurations 1 à 4, les besoins de chauffage et d'ECS sont assurés par une chaudière au Mazout. Pour les configurations 5 et 6, ces besoins sont assurés par des panneaux solaires thermiques, avec complément électrique fourni par des panneaux photovoltaïques produisant également l'énergie électrique auxiliaire.

Dans tous les cas, les besoins de refroidissement sont assurés par le renouvellement de l'air au sein du bâtiment, ce qui nécessite un apport électrique, également fourni par des panneaux photovoltaïques pour les configurations 5 et 6.

### *L'analyse de cycle de vie*

Dans chacun des cas, une analyse de cycle de vie a été effectuée à l'échelle du bâtiment entier, et ce, en prenant en compte la vie complète de celui-ci. Cette analyse inclut donc la déconstruction ou démolition des éléments démolis, les matériaux de rénovation ou de nouvelle construction, la phase de démolition finale du bâtiment, mais aussi l'ensemble de la consommation énergétique nécessaire au fonctionnement du bâtiment durant son temps d'utilisation.

Les indicateurs environnementaux étudiés dans le cadre de ce travail sont :

- le réchauffement climatique (kg CO<sub>2</sub>) ;
- l'acidification des sols (kg SO<sub>2</sub>) ;
- l'eutrophisation des eaux (kg PO<sub>4</sub>) ;
- la consommation en énergie primaire (MJ).

On rappellera que ces quatre indicateurs ont été choisis pour leur représentativité du changement climatique remis en question dans l'introduction de ce travail, ainsi que pour leur apport direct en relation avec la dégradation des milieux terrestres et océaniques.

Les données préalables nécessaires à la bonne exécution de cette analyse de cycle de vie ont été calculées via le logiciel *One Click LCA*, dans le respect de la norme ISO 14040, entre autres.

### *L'étude des coûts*

En complément de l'analyse de cycle de vie des bâtiments, une étude des coûts de revient des travaux de construction/rénovation, de démolition ou de remplacement de matériaux a été réalisée. Le coût de consommation énergétique annuel est également pris en compte et intégré au bilan financier global de chaque configuration.

## 5.1 EX – BÂTIMENT EXISTANT

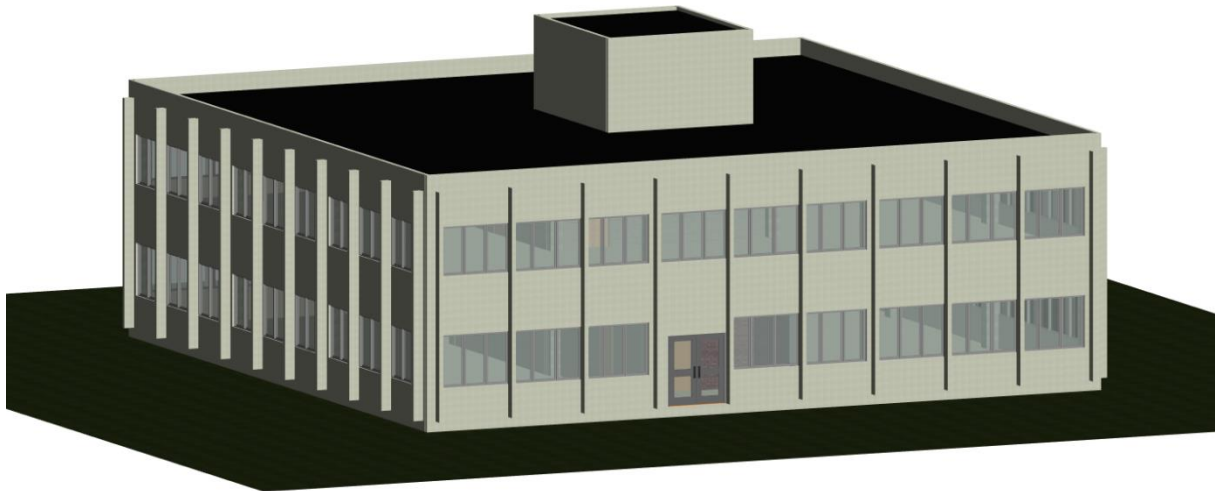


Figure 5-1 Bâtiment existant, modélisation 3D

### 5.1.1 Consommation énergétique

Le bâtiment existant comprend 1570,80 m<sup>2</sup> de parois déperditives, pour une valeur U moyenne de l'enveloppe de 2,358.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-2). On constate que les apports solaires et internes sont loin de subvenir aux besoins de chauffe, même en période estivale. On remarque néanmoins une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 3,4%. Le besoin de chauffage annuel est de 194,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration. Pour rappel, le besoin de chauffage à atteindre afin de respecter les normes passives est de 15 kWh/(m<sup>2</sup>a).

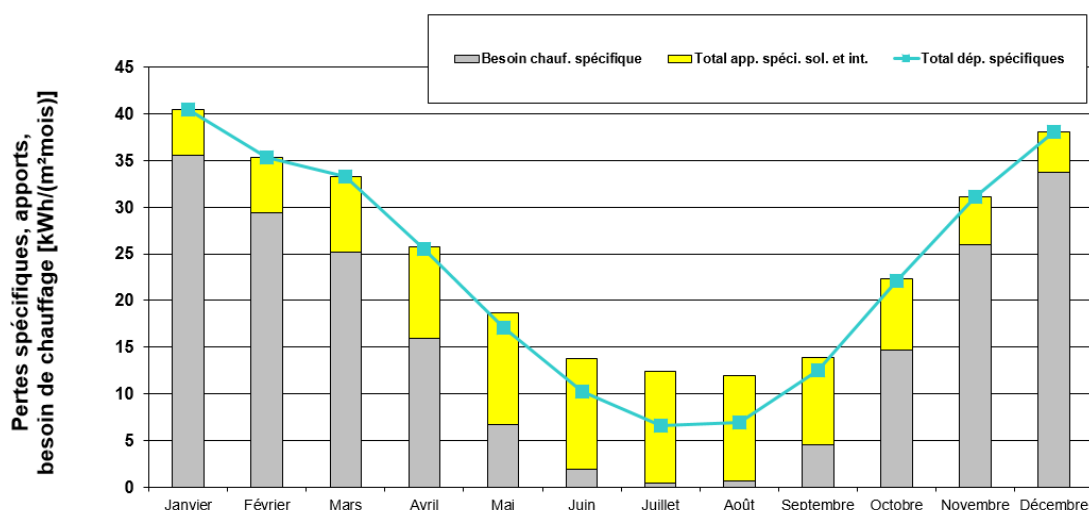


Figure 5-2 Besoin de chauffage EX – Bâtiment existant (PHPP)



Le besoin de refroidissement est, en revanche, assez faible, comme on peut le constater sur la Figure 5-3. Le besoin de refroidissement annuel est de 7,211 kWh/(m<sup>2</sup>a).

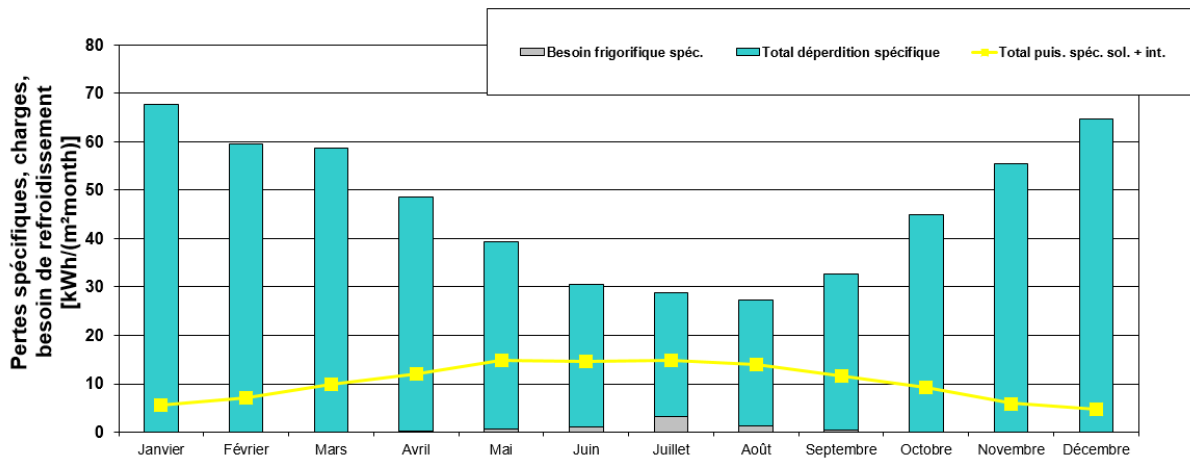


Figure 5-3 Besoin de refroidissement EX – Bâtiment existant (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d'eau par jour, est de 15600 kWh/a pour l'ensemble du bâtiment. Cette valeur est la seule qui reste constante pour chacune des configurations d'étude car elle n'est pas influencée par les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4236 kWh/a dans le cas du bâtiment existant.

### 5.1.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l'explication du concept d'analyse de cycle de vie page 23, l'analyse de cycle de vie des configurations d'étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

#### Le réchauffement climatique

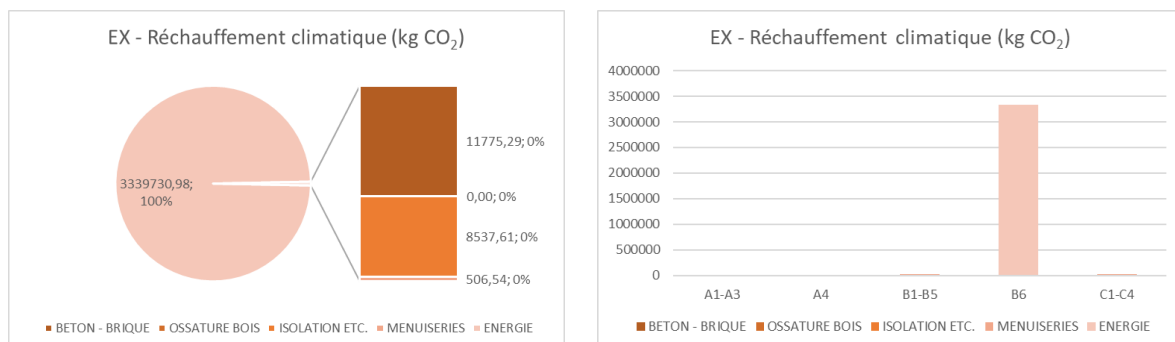


Figure 5-4 ACV EX – Réchauffement climatique

### L'acidification des sols

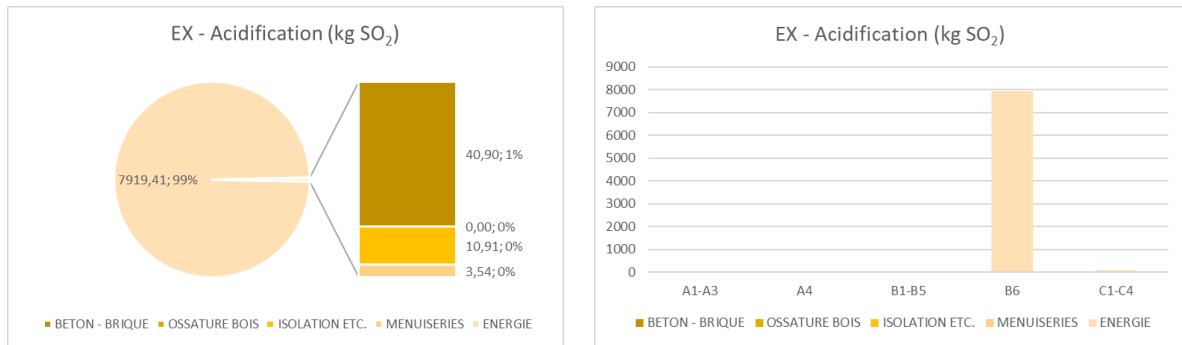


Figure 5-5 ACV EX – Acidification des sols

### L'eutrophisation des eaux

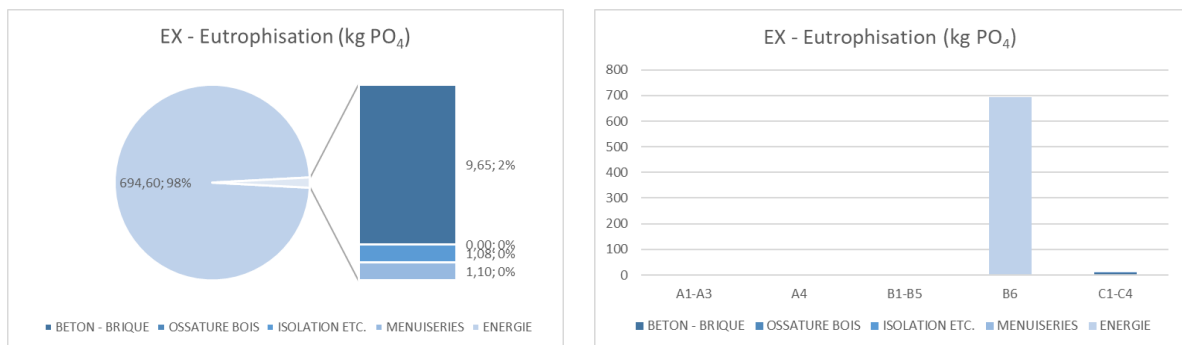


Figure 5-6 ACV EX – Eutrophisation des eaux

### La consommation en énergie primaire

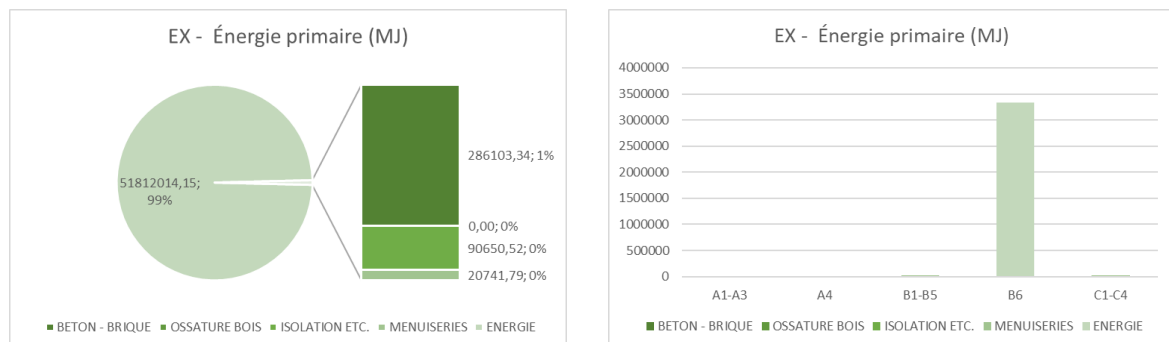


Figure 5-7 ACV EX – Consommation en énergie primaire

La première configuration d'étude traite le cas du bâtiment existant. De ce fait, il n'y a pas d'utilisation de nouveaux matériaux, mais seulement quelques remplacements de revêtement ou de menuiseries. On remarque clairement sur les Figure 5-4, Figure 5-5, Figure 5-6 et Figure 5-7 que près de 100% des impacts environnementaux relatifs à cette configuration sont dus à la consommation énergétique du bâtiment, intervenant dans la phase B6 de l'analyse de cycle de vie.

### 5.1.3 Étude des coûts

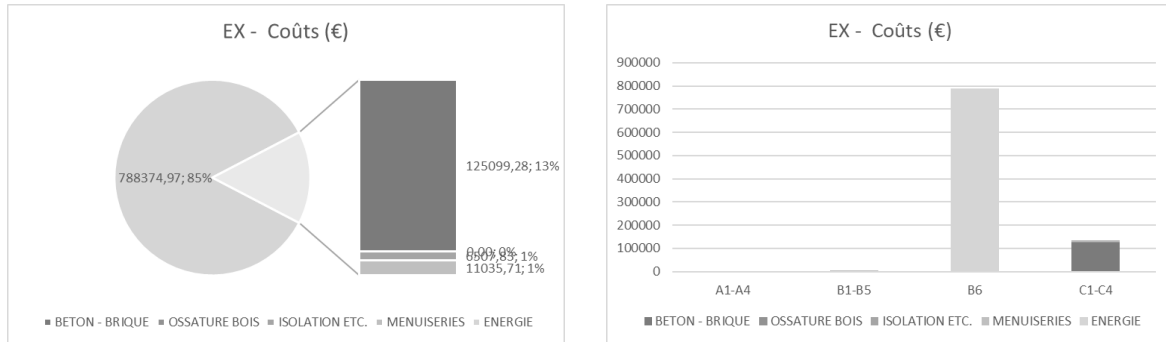


Figure 5-8 EX – Étude des coûts

Dans le cas de cette première configuration d'étude traitant le bâtiment existant, les coûts de construction sont nuls, tandis que les coûts de maintenance sont extrêmement bas. On peut constater à la Figure 5-8 que 85% des coûts du cycle de vie du bâtiment viennent de sa consommation énergétique. Le reste fait partie des coûts de fin de vie qui comptent pour 13% des coûts globaux qui valent, pour une durée de vie de 50 ans, **931 017,79 euros**.

### 5.1.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>EX</b>	Bâtiment existant	3360550,42	7974,76	706,43	52209509,80	931017,79

## 5.2 R0 – RÉNOVATION MINIMALISTE

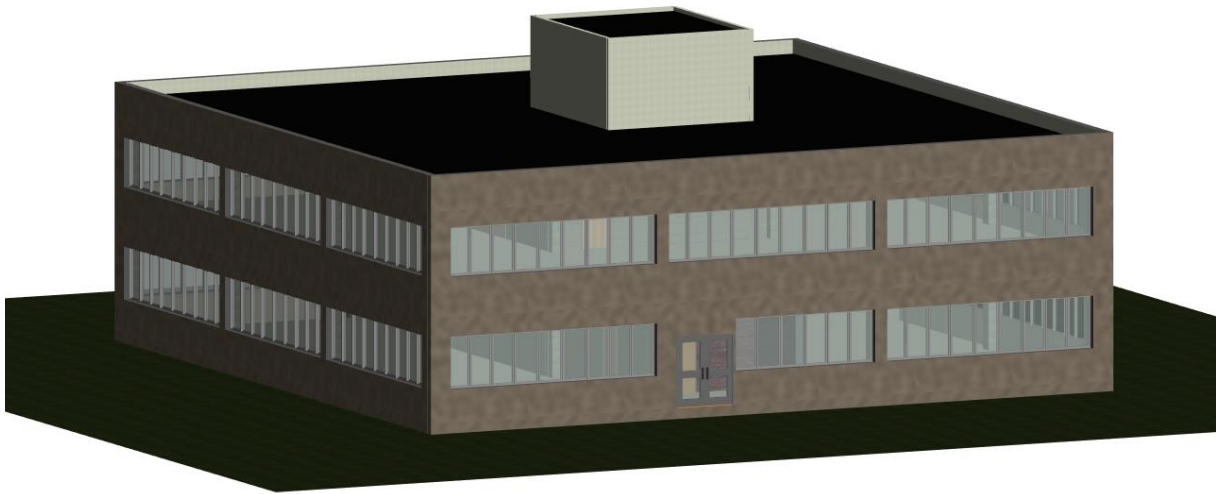


Figure 5-9 Rénovation minimaliste, modélisation 3D

### 5.2.1 Consommation énergétique

La seconde configuration d'étude, la rénovation minimaliste, comprend 1570,80 m<sup>2</sup> de parois déperditives, pour une valeur U moyenne de l'enveloppe de 1,067.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-10). On constate que les apports solaires et internes sont loin de subvenir aux besoins de chauffe, sauf en période estivale. On remarque une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 8,8%. Le besoin de chauffage annuel est de 34,6 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration, soit déjà 5 fois moins que le besoin de chauffage de la configuration existante.

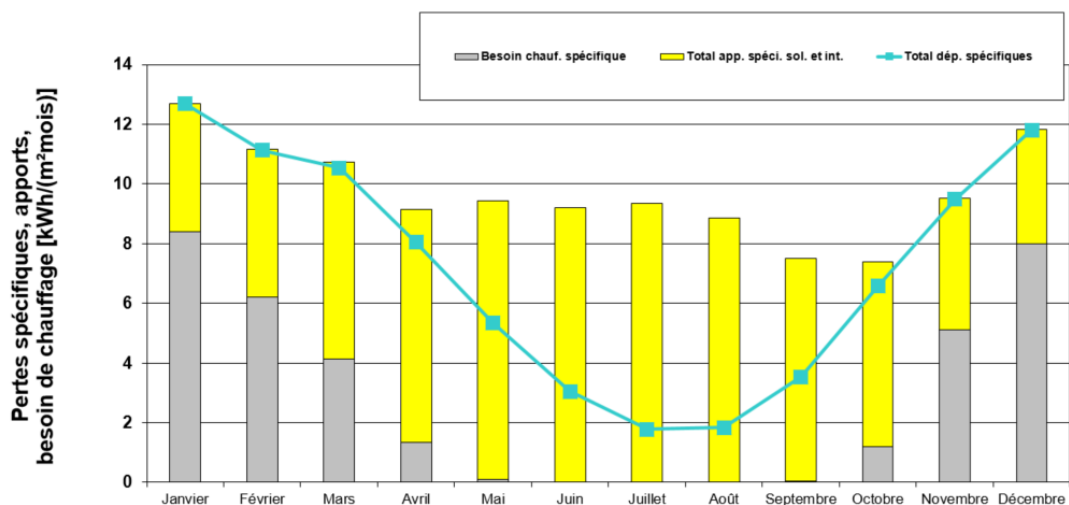


Figure 5-10 Besoin de chauffage R0 – Rénovation minimaliste (PHPP)

Pour rappel, le besoin de chauffage à atteindre afin de respecter les normes passives est de 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), il reste donc de la performance à gagner.

Le besoin de refroidissement est toujours assez faible, comme on peut le constater sur la Figure 5-11. Le besoin de refroidissement annuel est de 7,608 kWh/(m<sup>2</sup>a).

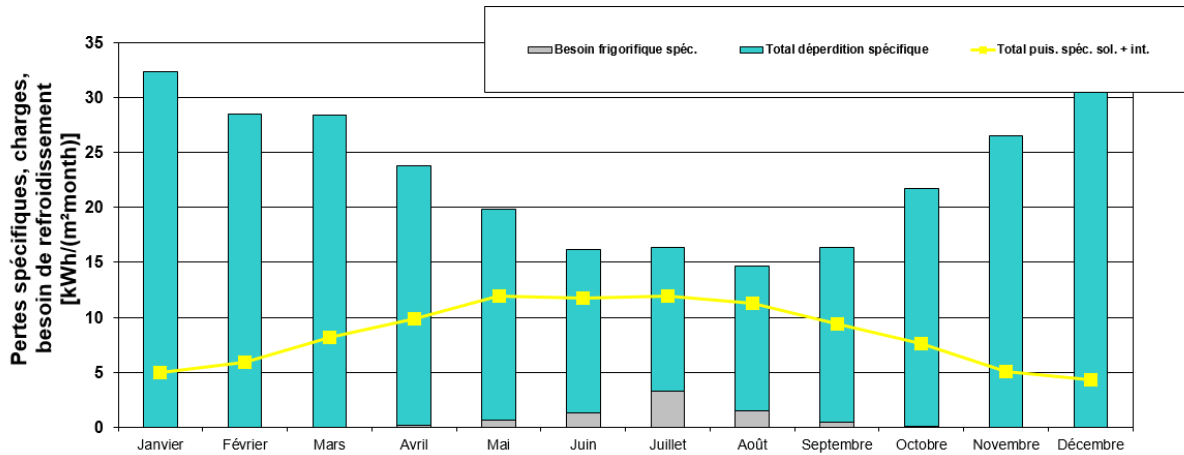


Figure 5-11 Besoin de refroidissement R0 – Rénovation minimaliste (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d’eau par jour, est constante à 15600 kWh/a pour l’ensemble du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4235 kWh/a dans le cas de cette rénovation minimaliste.

## 5.2.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l’explication du concept d’analyse de cycle de vie page 23, l’analyse de cycle de vie des configurations d’étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l’acidification des sols, l’eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

### Le réchauffement climatique

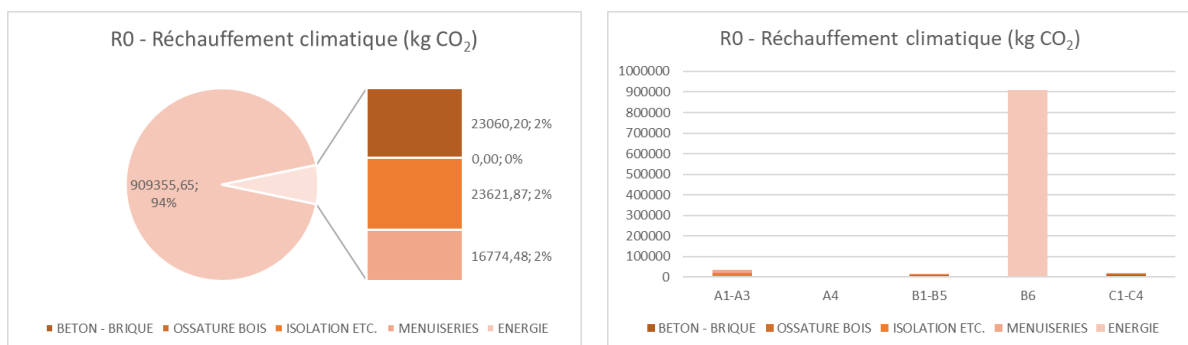


Figure 5-12 ACV R0 – Réchauffement climatique

### L'acidification des sols

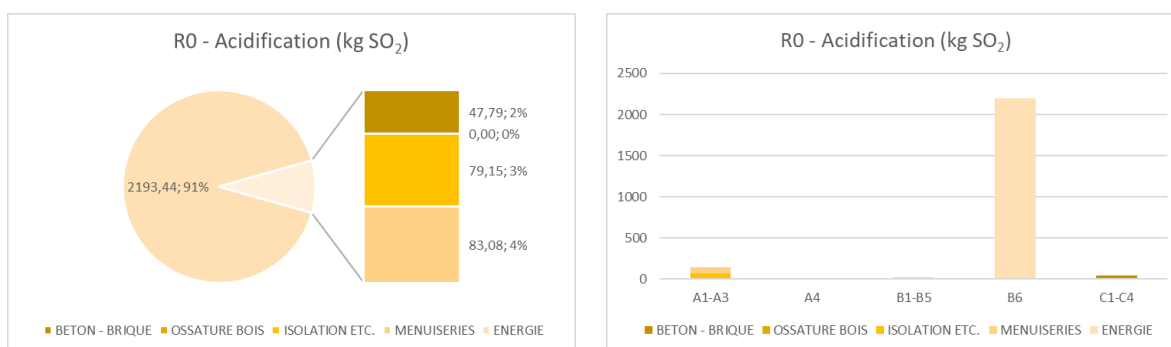


Figure 5-13 ACV R0 – Acidification des sols

### L'eutrophisation des eaux

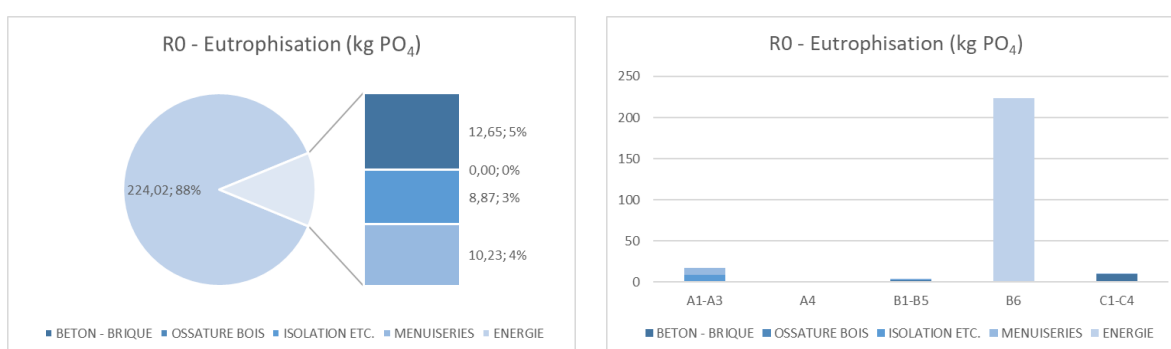


Figure 5-14 ACV R0 – Eutrophisation des eaux

### La consommation en énergie primaire

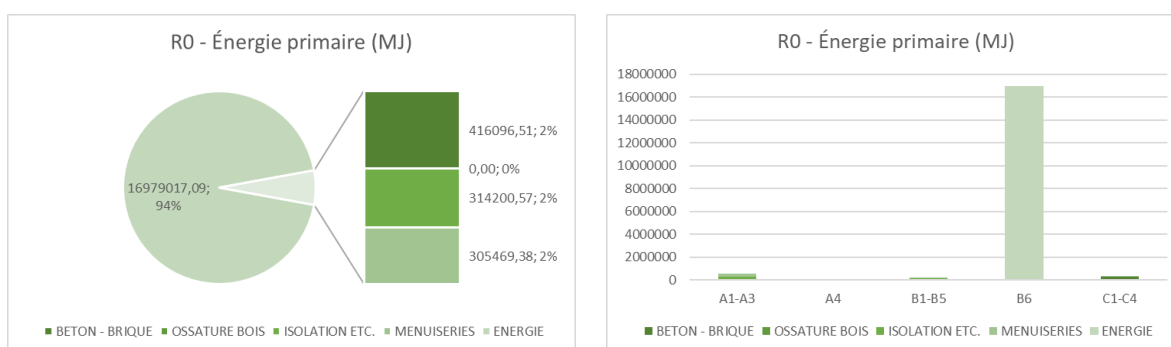


Figure 5-15 ACV R0 – Consommation en énergie primaire

La seconde configuration d'étude traite le cas d'une rénovation minimaliste. On remarque en effet sur les Figure 5-12, Figure 5-13, Figure 5-14 et Figure 5-15 que la majeure partie (94%) des impacts environnementaux relatifs à cette configuration est due à la consommation énergétique du bâtiment, intervenant dans la phase B6 de l'analyse de cycle de vie.

Quelques pourcents sont maintenant dus à la phase A1-A3 de construction, représentant les travaux de rénovation. L'augmentation relative à la phase B1-B5 de maintenance est due au crépi qui doit être renouvelé tous les 20 ans environ, mais qui, à court ou à moyen terme, constitue une solution financièrement intéressante.

### 5.2.3 Étude des coûts

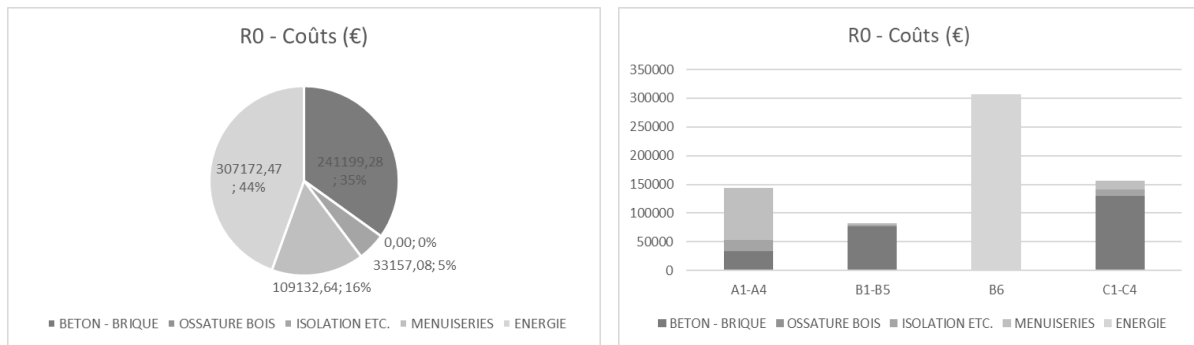


Figure 5-16 R0 – Étude des coûts

Dans le cas de cette seconde configuration d'étude traitant d'une rénovation minimaliste, les coûts sont assez équitablement partagés entre chacune des phases de vie du bâtiment. On peut constater à la Figure 5-16 que 44% des coûts du cycle de vie du bâtiment viennent de sa consommation énergétique. Du reste, les éléments en béton et en briques coûtent toujours assez cher lors de la démolition du bâtiment. Cette somme équivaut dans ce cas à près de 40% du coût global.

La rénovation la plus coûteuse dans le cas de cette seconde configuration concerne le remplacement des châssis pour du double vitrage isolant. Les coûts globaux valent pour cette seconde configuration, pour une durée de vie de 50 ans, **690 661,46 euros**, soit environ 240 000 euros de moins que dans le cas du bâtiment existant.

### 5.2.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>R0</b>	Rénovation minimaliste	972812,20	2403,46	255,77	18014783,55	690661,46

## 5.3 R1 – RÉNOVATION TRADITIONNELLE PASSIVE

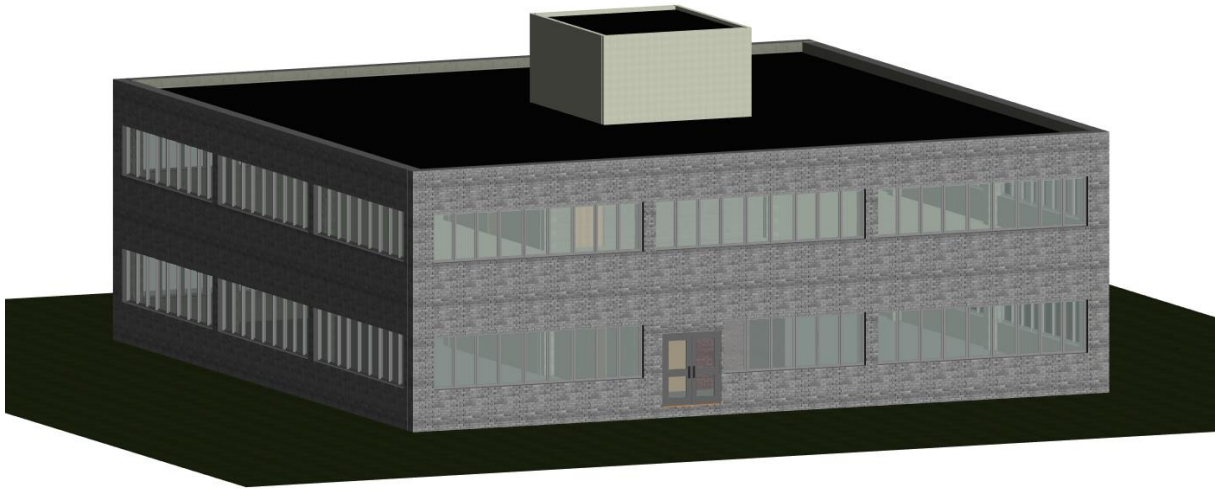


Figure 5-17 Rénovation traditionnelle passive, modélisation 3D

### 5.3.1 Consommation énergétique

La troisième configuration d'étude, la rénovation traditionnelle passive, comprend 1570,80 m<sup>2</sup> de parois déperditives, pour une valeur U moyenne de l'enveloppe de 0,368.

Les valeurs U de chacune des parois directement en contact avec le milieu extérieur sont descendues en dessous de 0,15, à l'exception de la dalle de sol qui, difficile à isoler, atteint seulement une valeur U de 0,51.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-18). On constate que les apports solaires et internes peuvent subvenir aux besoins de chauffe durant la moitié de l'année. On remarque une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 9,7 %.

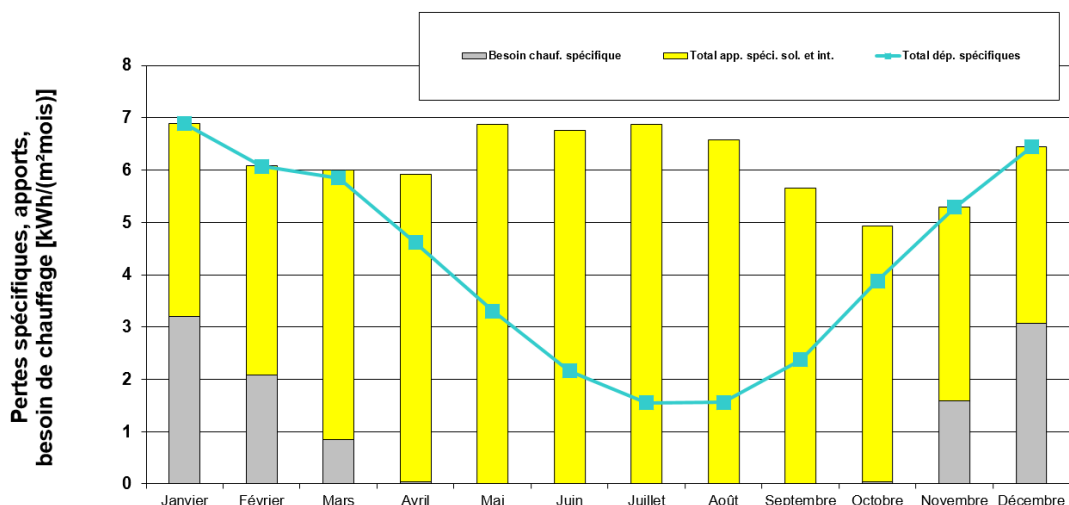


Figure 5-18 Besoin de chauffage R1 – Rénovation traditionnelle passive (PHPP)



Le besoin de chauffage annuel est de 10,9 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration, soit moins de 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), norme de besoin de chauffage passif.

Le besoin de refroidissement est toujours assez faible, et les déperditions thermiques continuent de diminuer, comme on peut le constater sur la Figure 5-19. Le besoin de refroidissement annuel est de 4,245 kWh/(m<sup>2</sup>a).

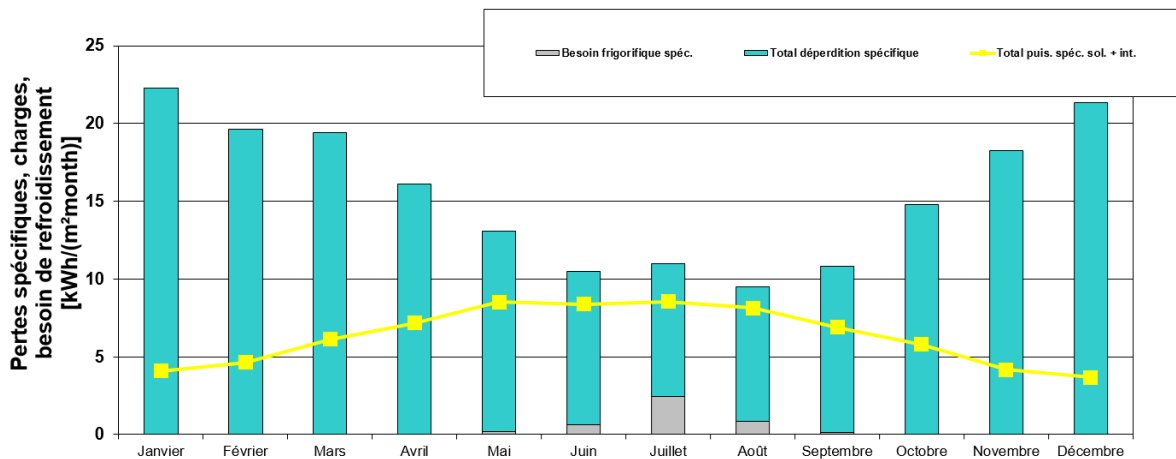


Figure 5-19 Besoin de refroidissement R1 – Rénovation traditionnelle passive (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d’eau par jour, est constante à 15600 kWh/a pour l’ensemble du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4063 kWh/a dans le cas de cette rénovation traditionnelle passive.

### 5.3.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l’explication du concept d’analyse de cycle de vie page 23, l’analyse de cycle de vie des configurations d’étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l’acidification des sols, l’eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

#### Le réchauffement climatique

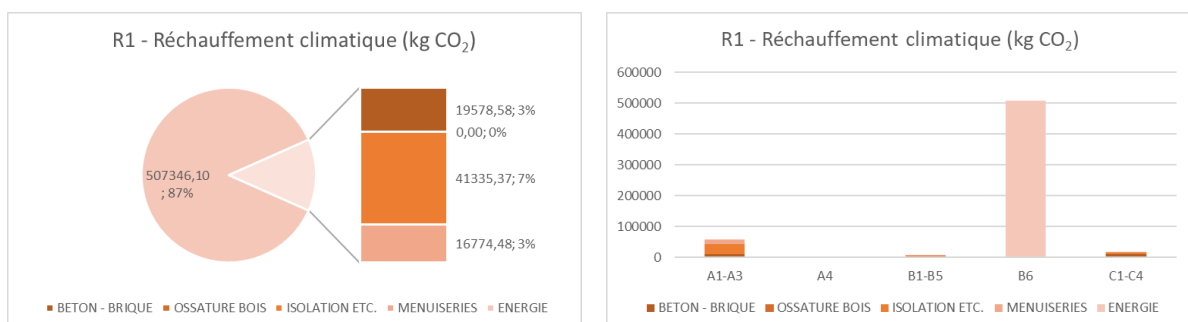


Figure 5-20 ACV R1 – Réchauffement climatique

### L'acidification des sols

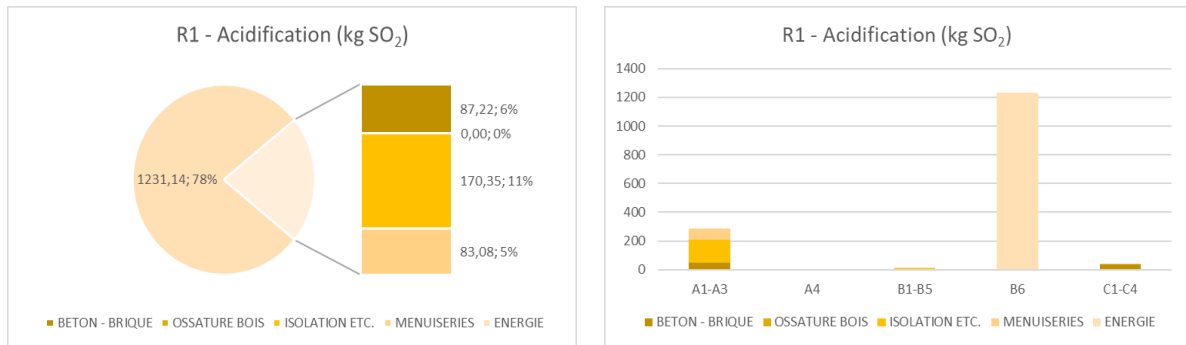


Figure 5-21 ACV R1 – Acidification des sols

### L'eutrophisation des eaux

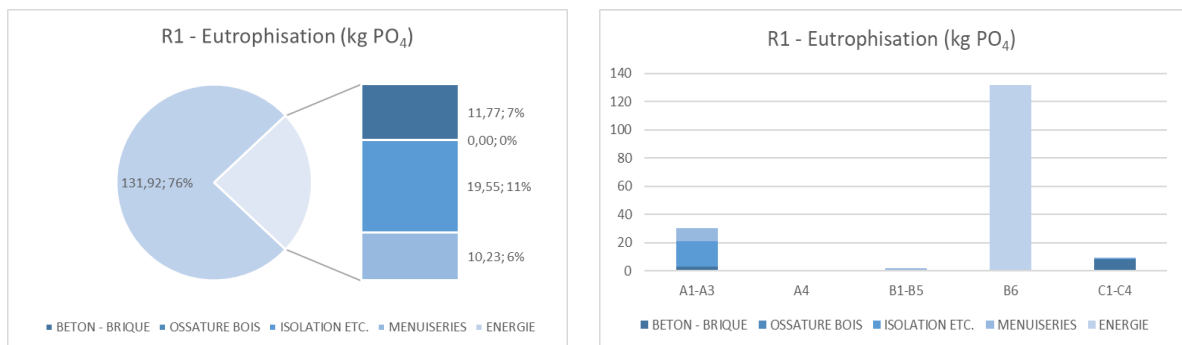


Figure 5-22 ACV R1 – Eutrophisation des eaux

### La consommation en énergie primaire

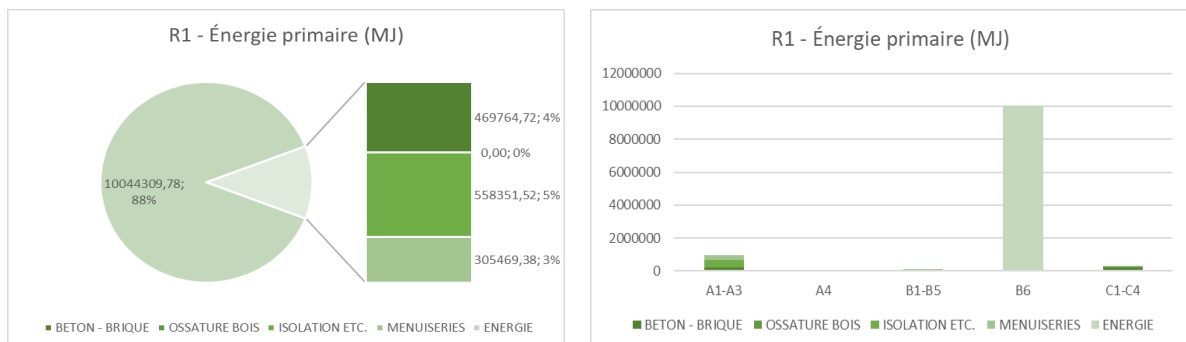


Figure 5-23 ACV R1 – Consommation en énergie primaire

La troisième configuration d'étude traite le cas d'une rénovation passive en construction traditionnelle. On remarque sur les Figure 5-20, Figure 5-21, Figure 5-22 et Figure 5-23 que plus de trois quarts des impacts environnementaux relatifs à cette configuration sont toujours dus à la consommation énergétique du bâtiment, intervenant dans la phase B6 de l'analyse de cycle de vie.

Une partie plus importante des impacts est dans ce cas occasionnée par la phase A1-A3 de construction, représentant les travaux de rénovation. Le matériau le plus impactant est le matériau isolant, quel que soit le facteur d'impact environnemental étudié.

### 5.3.3 Étude des coûts

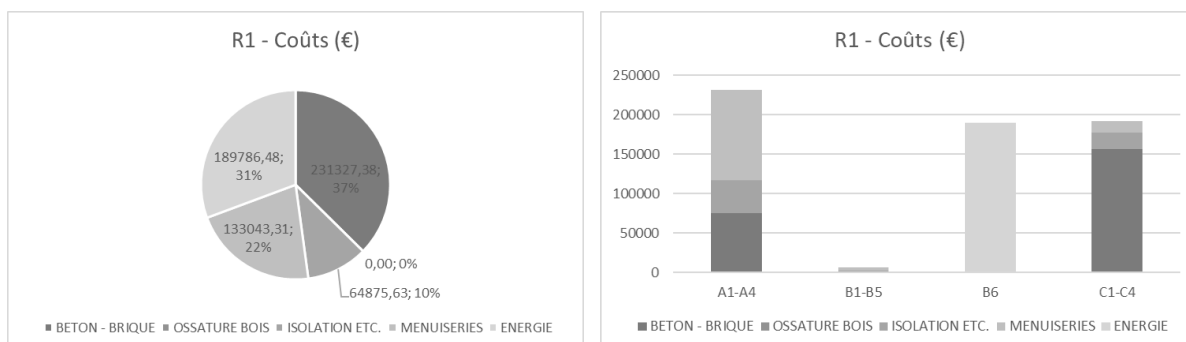


Figure 5-24 R1 – Étude des coûts

Dans le cas de cette troisième configuration d'étude traitant d'une rénovation traditionnelle passive, on remarque sur le graphique de gauche de la Figure 5-24 que la consommation énergétique du bâtiment ne compte plus que pour 31% des coûts de cycle de vie du bâtiment (contre 34% dans la configuration précédente de rénovation minimaliste). Aussi, les éléments en béton et en briques coûtent toujours assez cher, surtout lors de la démolition du bâtiment. Cette somme équivaut à nouveau à près de 40% du coût global.

La rénovation la plus coûteuse dans le cas de cette troisième configuration concerne à nouveau le remplacement des châssis, cette fois-ci pour du triple vitrage isolant. Les coûts globaux valent pour cette troisième configuration, pour une durée de vie de 50 ans, **619 032,81 euros**, soit plus de 310 000 euros de moins que dans le cas du bâtiment existant et 70 000 euros de moins que dans la configuration de rénovation minimaliste.

### 5.3.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>RO</b>	Rénovation minimaliste	585034,52	1571,79	173,47	11377895,40	619032,81

## 5.4 R2 – RÉNOVATION OSSATURE BOIS PASSIVE

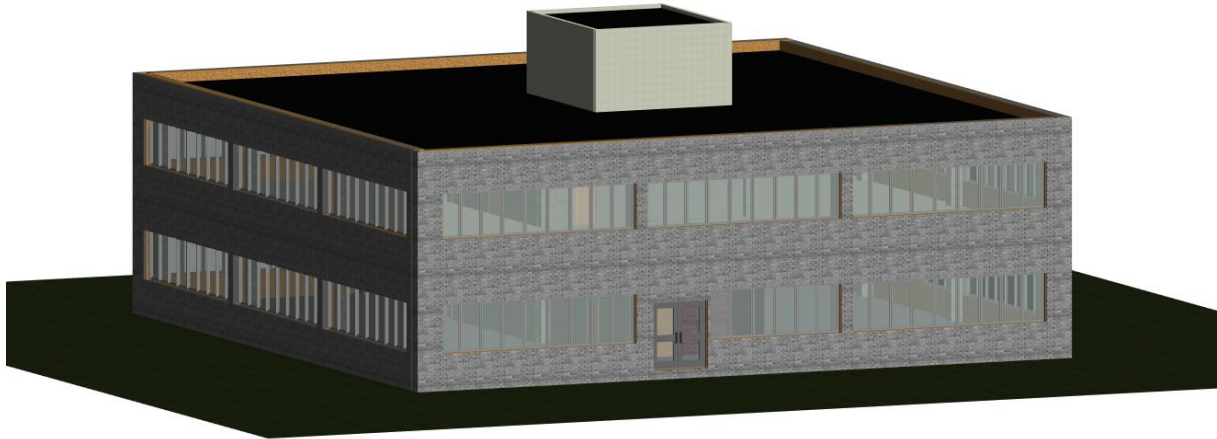


Figure 5-25 Rénovation ossature bois passive, modélisation 3D

### 5.4.1 Consommation énergétique

La quatrième configuration d'étude, la rénovation ossature bois passive, comprend 1570,80 m<sup>2</sup> de parois déperditives, pour une valeur U moyenne de l'enveloppe de 0,359 (très similaire à la valeur U moyenne de l'enveloppe de la configuration précédente qui valait 0,368).

Les valeurs U de chacune des parois directement en contact avec le milieu extérieur sont descendues en dessous de 0,15 à l'exception de la dalle de sol qui, difficile à isoler, atteint seulement une valeur U de 0,51.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-26). On constate que les apports solaires et internes peuvent subvenir aux besoins de chauffe durant la moitié de l'année. On remarque une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 10 %.

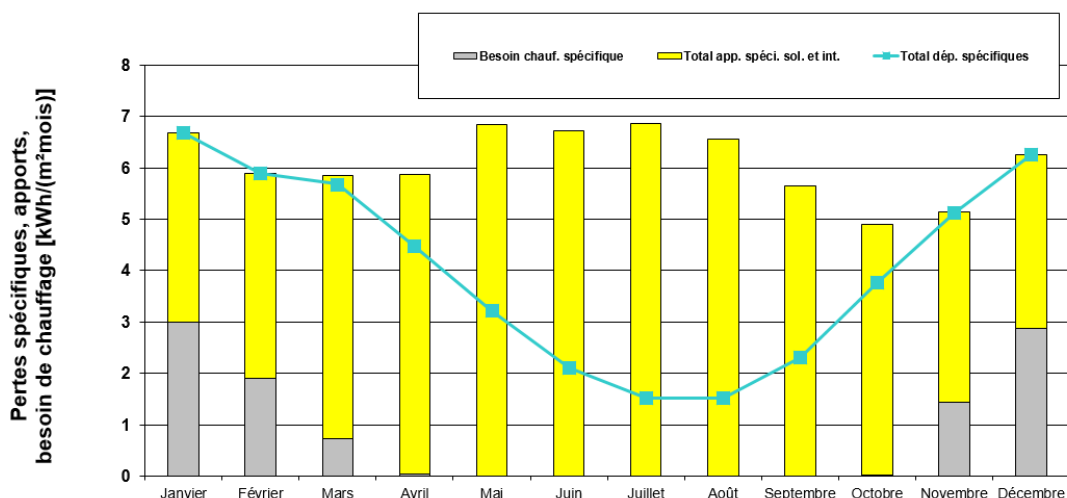


Figure 5-26 Besoin de chauffage R2 – Rénovation ossature bois passive (PHPP)

Le besoin de chauffage annuel est de 10,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration, soit moins de 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), norme de besoin de chauffage passif.

Le besoin de refroidissement est toujours assez faible, et les déperditions thermiques continuent de diminuer, comme on peut le constater sur la Figure 5-27. Le besoin de refroidissement annuel est de 4,293 kWh/(m<sup>2</sup>a).

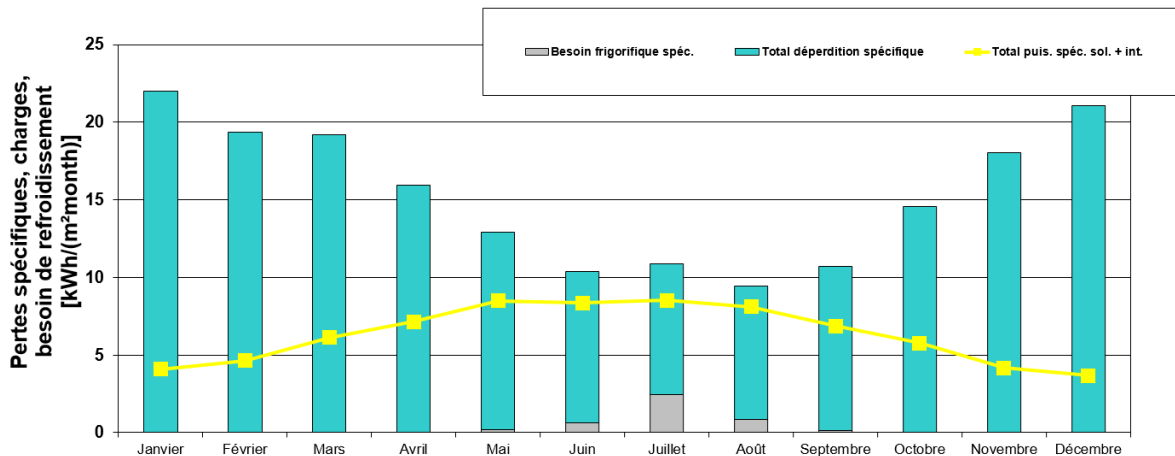


Figure 5-27 Besoin de refroidissement R2 – Rénovation ossature bois passive (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d'eau par jour, est constante à 15600 kWh/a pour l'ensemble du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4055 kWh/a dans le cas de cette rénovation en ossature bois passive.

## 5.4.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l'explication du concept d'analyse de cycle de vie page 23, l'analyse de cycle de vie des configurations d'étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

### Le réchauffement climatique

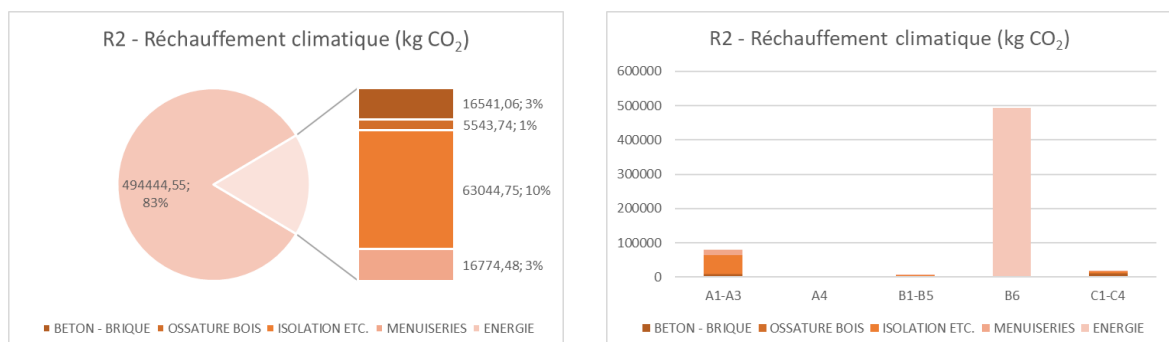


Figure 5-28 ACV R2 – Réchauffement climatique

### L'acidification des sols

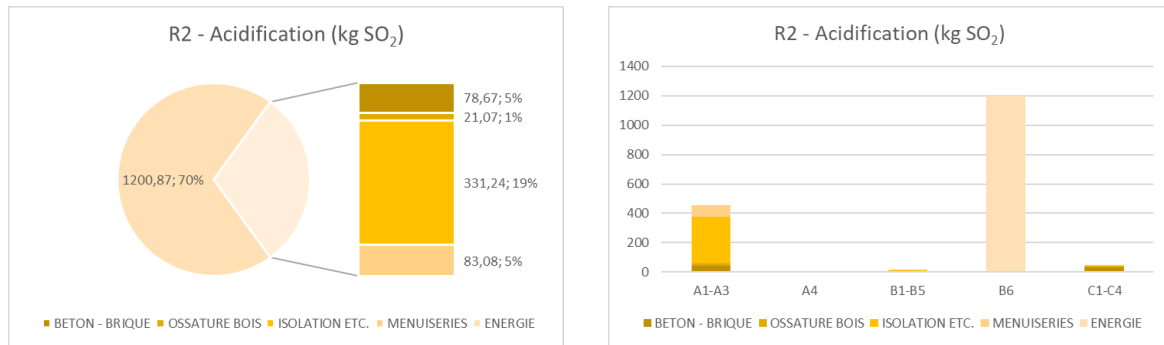


Figure 5-29 ACV R2 – Acidification des sols

### L'eutrophisation des eaux

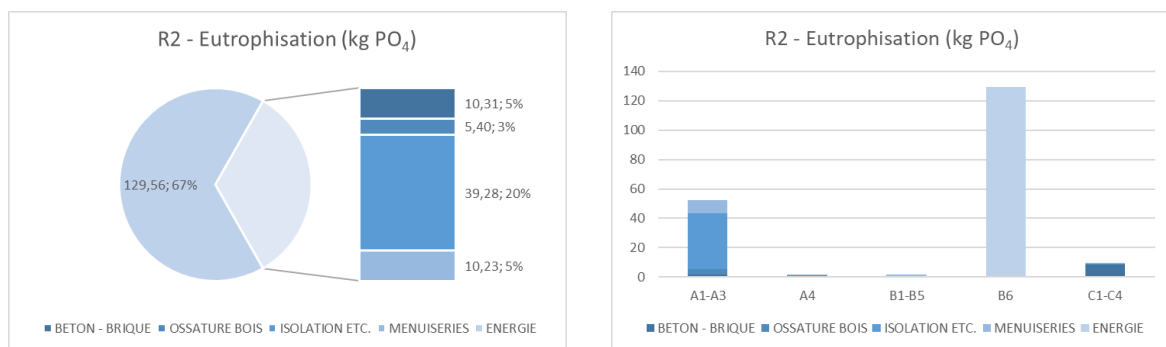


Figure 5-30 ACV R2 – Eutrophisation des eaux

### La consommation en énergie primaire

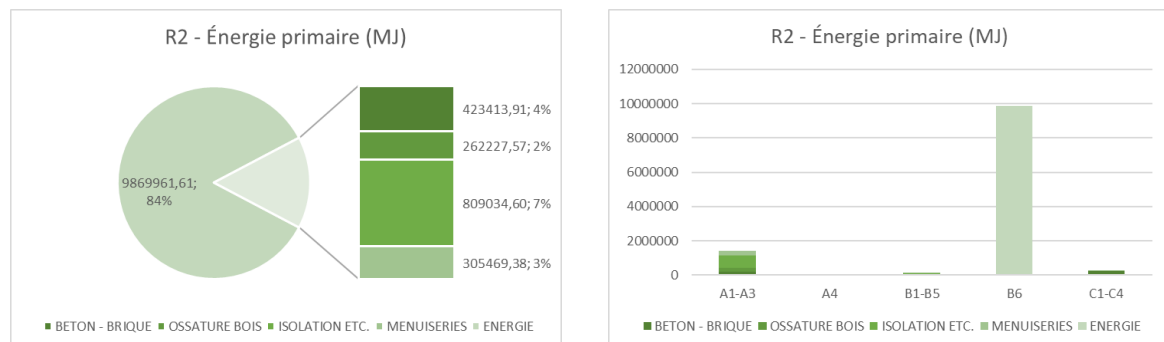


Figure 5-31 ACV R2 – Consommation en énergie primaire

La quatrième configuration d'étude traite le cas d'une rénovation passive en ossature bois. On remarque sur les Figure 5-28, Figure 5-29, Figure 5-30 et Figure 5-31 que plus de trois quarts des impacts environnementaux relatifs à cette configuration sont toujours dus à la consommation énergétique du bâtiment, intervenant dans la phase B6 de l'analyse de cycle de vie. Il s'agit ici de résultats très similaires à ceux obtenus lors de la configuration précédente de rénovation passive traditionnelle.

Une partie plus importante des impacts est dans ce cas aussi occasionnée par la phase A1-A3 de construction, représentant les travaux de rénovation. Le matériau le plus impactant est toujours le matériau isolant, quel que soit le facteur d'impact environnemental étudié.

### 5.4.3 Étude des coûts

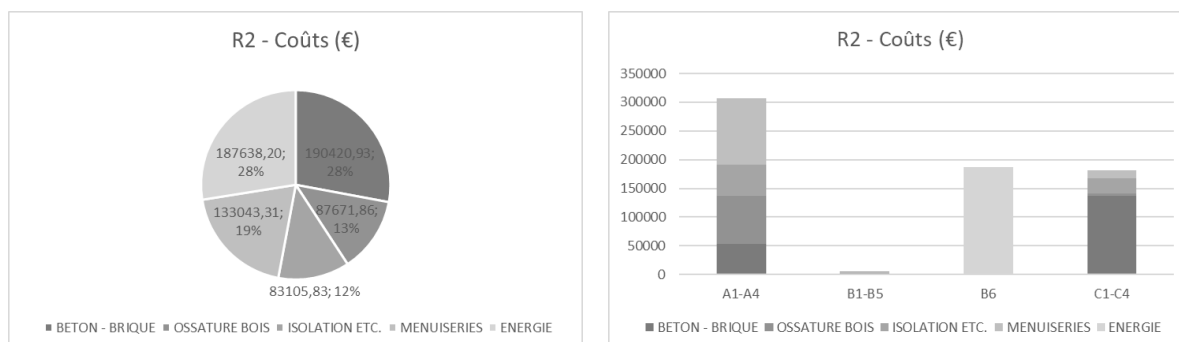


Figure 5-32 R2 – Étude des coûts

Dans le cas de cette quatrième configuration d'étude traitant d'une rénovation traditionnelle en ossature bois, on remarque sur le graphique de gauche de la Figure 5-32 que la consommation énergétique du bâtiment ne compte plus que pour 28% des coûts de cycle de vie du bâtiment (contre 44% dans la configuration de rénovation minimaliste et 31% dans le cas de la rénovation passive traditionnelle). Aussi, les éléments en béton et en briques coûtent toujours assez cher, surtout lors de la démolition du bâtiment. Les éléments d'ossature en bois comptent aussi pour une importante partie dans la phase de rénovation, et pour 19% du coût global, au même titre que l'isolation.

La rénovation la plus coûteuse dans le cas de cette quatrième configuration concerne à nouveau le remplacement des châssis, cette fois-ci également par du triple vitrage isolant. Les coûts globaux valent pour cette quatrième configuration, pour une durée de vie de 50 ans, **681 880,14 euros**, soit un peu plus de 60 000 euros plus cher que pour la rénovation traditionnelle, mais néanmoins environ 10 000 euros de moins que pour la rénovation minimaliste, et près de 250 000 euros de moins que dans le cas du bâtiment existant.

### 5.4.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>R2</b>	Rénovation ossature bois passive	596348,57	1714,93	194,78	11670107,07	681880,14

## 5.5 NC1 – RECONSTRUCTION TRADITIONNELLE PASSIVE+



Figure 5-33 Reconstruction traditionnelle passive+, modélisation 3D

### 5.5.1 Consommation énergétique

La cinquième configuration d'étude, la reconstruction traditionnelle passive plus, comprend 1290,61 m<sup>2</sup> de parois déperditives, soit 18% de moins que dans le cas des configurations précédentes. Cela est une conséquence de la nouvelle conception sur trois étages plutôt que deux, ce qui a pour but d'augmenter la compacité du bâtiment. La valeur U moyenne de l'enveloppe de 0,224.

Les valeurs U de chacune des parois directement en contact avec le milieu extérieur sont descendues aux environs de 0,1 y compris pour la dalle de sol qui peut maintenant être isolée correctement.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-34).



Figure 5-34 Besoin de chauffage NC1 – Reconstruction traditionnelle passive+ (PHPP)



On constate que les apports solaires et internes peuvent subvenir aux besoins de chauffe 8 mois par an. On remarque une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 0,2% suite à la pose de nouveaux vitrages avec protections solaires intermittentes ainsi qu'à l'augmentation de la proportion de fenêtres sur la façade Nord par rapport aux autres façades. Le besoin de chauffage annuel est de 3,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration, soit près de 5 fois moins que 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), norme de besoin de chauffage passif.

Le besoin de refroidissement est maintenant devenu très faible de par la baisse de la surchauffe estivale, et les déperditions thermiques continuent de diminuer, comme on peut le constater sur la Figure 5-35. Le besoin de refroidissement annuel est de 0,270 kWh/(m<sup>2</sup>a).

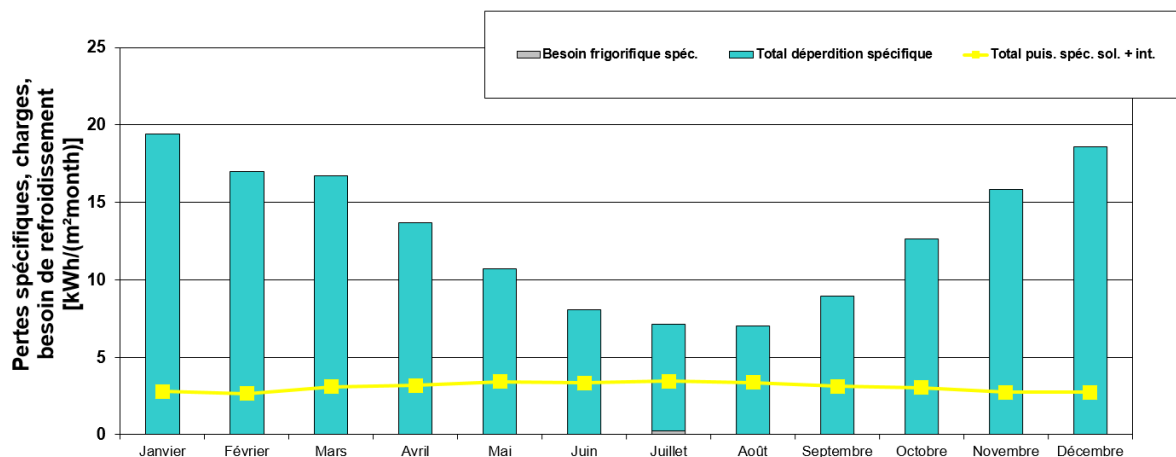


Figure 5-35 Besoin de refroidissement NC1 – Reconstruction traditionnelle passive+ (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d'eau par jour, est constante à 15600 kWh/a pour l'ensemble du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4065 kWh/a dans le cas de cette reconstruction en construction traditionnelle.

## 5.5.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l'explication du concept d'analyse de cycle de vie page 23, l'analyse de cycle de vie des configurations d'étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

### *Le réchauffement climatique*

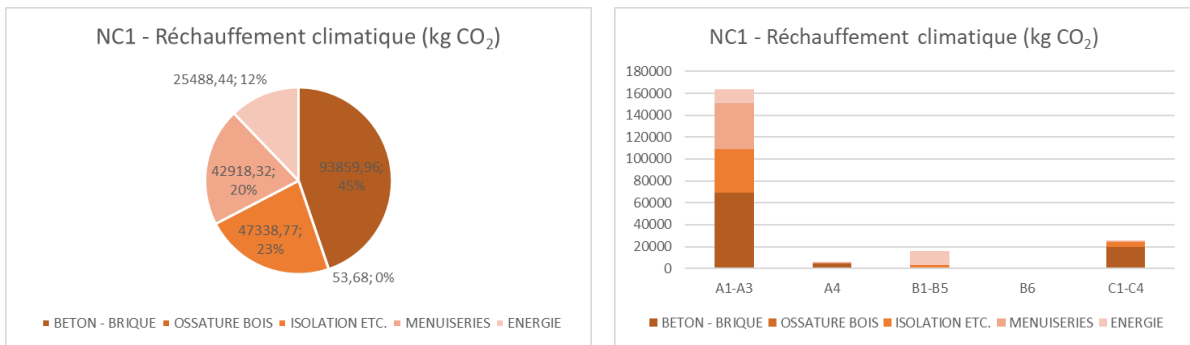


Figure 5-36 ACV NC1 – Réchauffement climatique

### *L'acidification des sols*

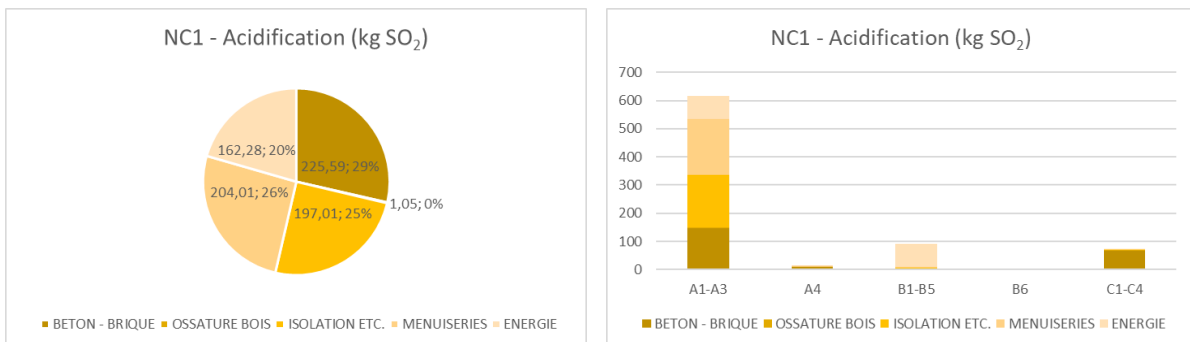


Figure 5-37 ACV NC1 – Acidification des sols

### *L'eutrophisation des eaux*

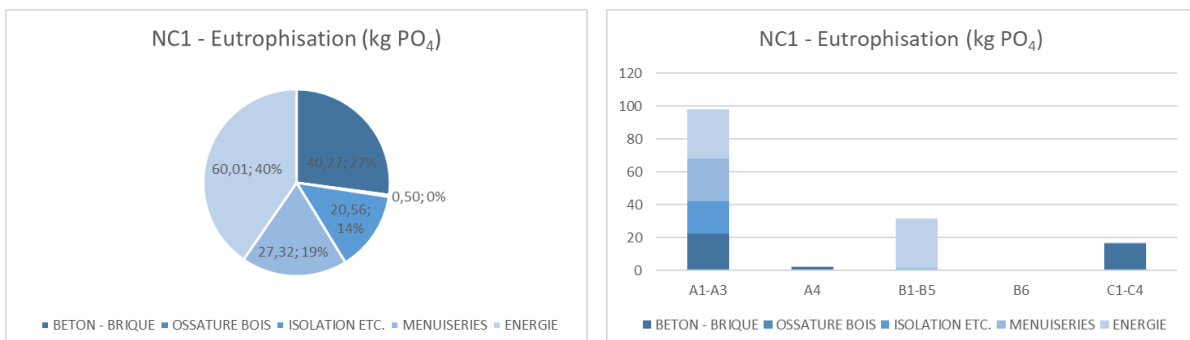


Figure 5-38 ACV NC1 – Eutrophisation des eaux

## La consommation en énergie primaire

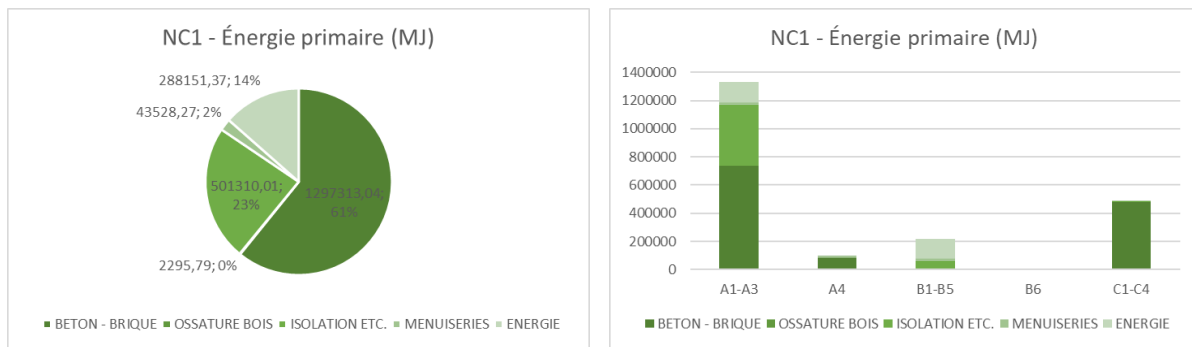


Figure 5-39 ACV NC1 – Consommation en énergie primaire

La cinquième configuration d'étude traite le cas d'une reconstruction passive en construction traditionnelle. On remarque sur les Figure 5-36, Figure 5-37, Figure 5-38 et Figure 5-39 que la phase B6 de l'analyse de cycle de vie, soit la phase de la consommation énergétique, n'impacte plus les différents facteurs. Cela est dû à l'intégration au bâtiment de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques afin de couvrir les demandes en chauffage et en électricité. La contribution environnementale de ces panneaux est alors retrouvée dans les phases A1-A3 (construction), B1-B5 (remplacement) et C1-C4 (fin de vie).

On remarque aussi que les impacts les plus significatifs viennent des éléments de maçonnerie en béton ou en briques, a fortiori en ce qui concerne la consommation en énergie primaire et la production de CO<sub>2</sub>. La production des panneaux solaires aura quant à elle un effet plus marqué sur l'eutrophisation des eaux, comme on peut le constater à la Figure 5-38.

## 5.5.3 Étude des coûts

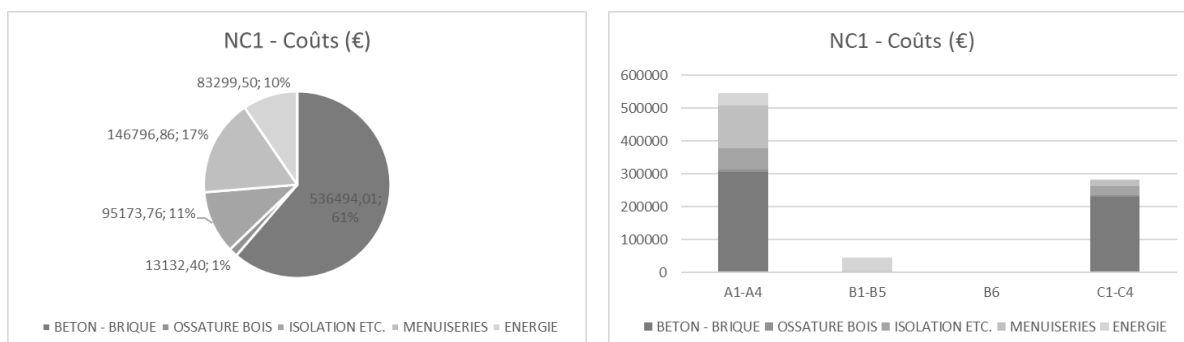


Figure 5-40 NC1 – Étude des coûts

Dans le cas de cette cinquième configuration d'étude traitant d'une reconstruction traditionnelle passive, on remarque sur le graphique de gauche de la Figure 5-40 que la consommation énergétique du bâtiment ne compte plus que pour 10% des coûts de cycle de vie du bâtiment, répartis majoritairement sur les phases de construction et de rénovation et plus sur la phase de consommation. Aussi, les éléments en béton et en briques représentent la majeure partie des coûts de reconstruction et de démolition avec plus de 60% du coût global.

Une part importante de 17% des coûts est également consacrée aux menuiseries en triple vitrage isolant.

Les coûts globaux valent pour cette cinquième configuration, pour une durée de vie de 50 ans, **874 896,52 euros**, soit plus cher que chacune des configurations précédentes. La reconstruction complète d'un bâtiment représente donc un investissement qui devra être étudié à plus long terme afin de déterminer à partir de quelle durée de vie il devient rentable. Cela sera fait au chapitre suivant.

## 5.5.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>NC1</b>	Reconstruction traditionnelle passive+	209659,17	789,94	148,65	2132598,49	874896,52

## 5.6 NC2 – RECONSTRUCTION OSSATURE BOIS PASSIVE+

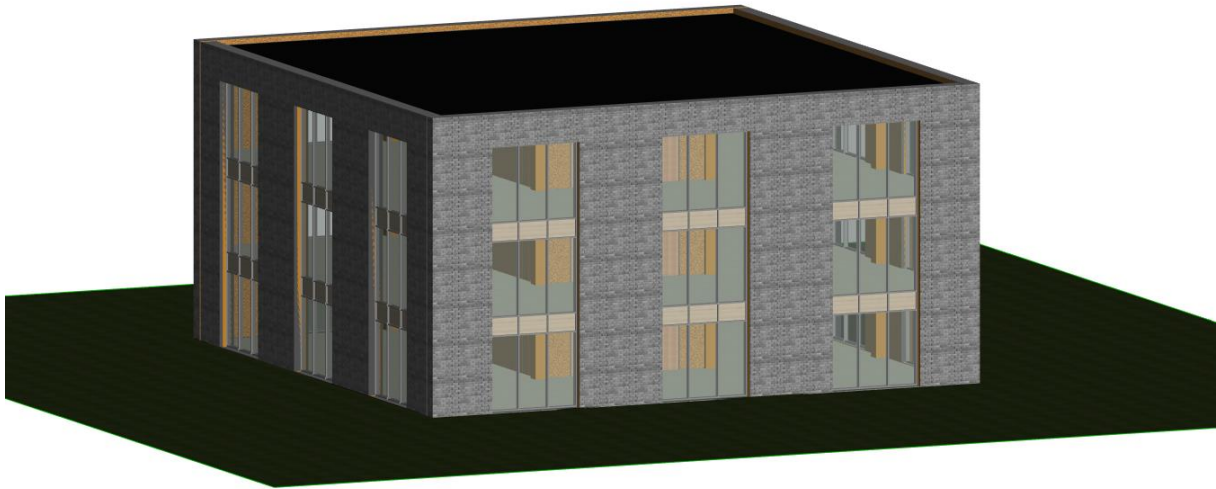


Figure 5-41 Reconstruction ossature bois passive+, modélisation 3D

### 5.6.1 Consommation énergétique

La sixième configuration d'étude, la reconstruction en ossature bois passive plus, comprend 1290,61 m<sup>2</sup> de parois déperditives, soit 18% de moins que dans le cas des configurations une à quatre. Cela est une conséquence de la nouvelle conception sur trois étages plutôt que deux, de même que pour la configuration précédente. La valeur U moyenne de l'enveloppe de 0,226 ( $\sim U_{\text{conf.5}} = 0,224$ ).

Chacune des valeurs U des nouvelles parois est nettement inférieure à la norme passive de 0,15. On obtient des valeurs U de 0,113 pour la dalle de sol (contre 0,51 avant), 0,110 pour les murs extérieurs et 0,094 pour la toiture.

En se basant sur les données climatiques de Bruxelles (BE), on peut obtenir le diagramme de besoins et apports spécifiques au chauffage du bâtiment (Figure 5-42).

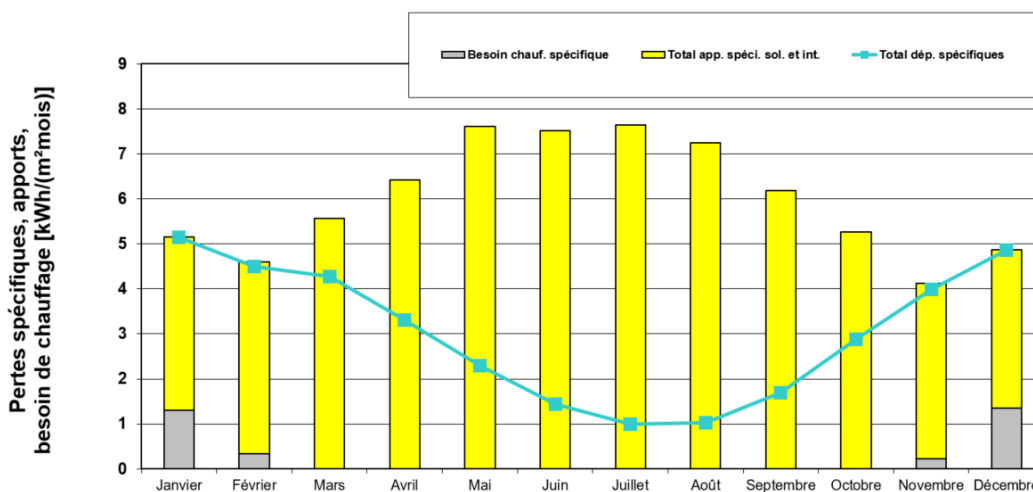


Figure 5-42 Besoin de chauffage NC2 – Reconstruction ossature bois passive+ (PHPP)

On constate que les apports solaires et internes peuvent subvenir aux besoins de chauffe 8 mois par an. On remarque une fréquence de surchauffe ( $T_{int} > 25^{\circ}\text{C}$ ) de 0,2% suite à la pose de nouveaux vitrages avec protections solaires ainsi qu'à l'augmentation de la proportion de fenêtres sur la façade Nord par rapport aux autres façades. Le besoin de chauffage annuel est de 3,211 kWh/(m<sup>2</sup>a) dans le cas de cette configuration, soit près de 5 fois moins que 15 kWh/(m<sup>2</sup>a), norme de besoin de chauffage passif.

Le besoin de refroidissement est maintenant devenu très faible de par la baisse de la surchauffe estivale, et les déperditions thermiques continuent de diminuer, comme on peut le constater sur la Figure 5-43. Le besoin de refroidissement annuel est de 0,271 kWh/(m<sup>2</sup>a).

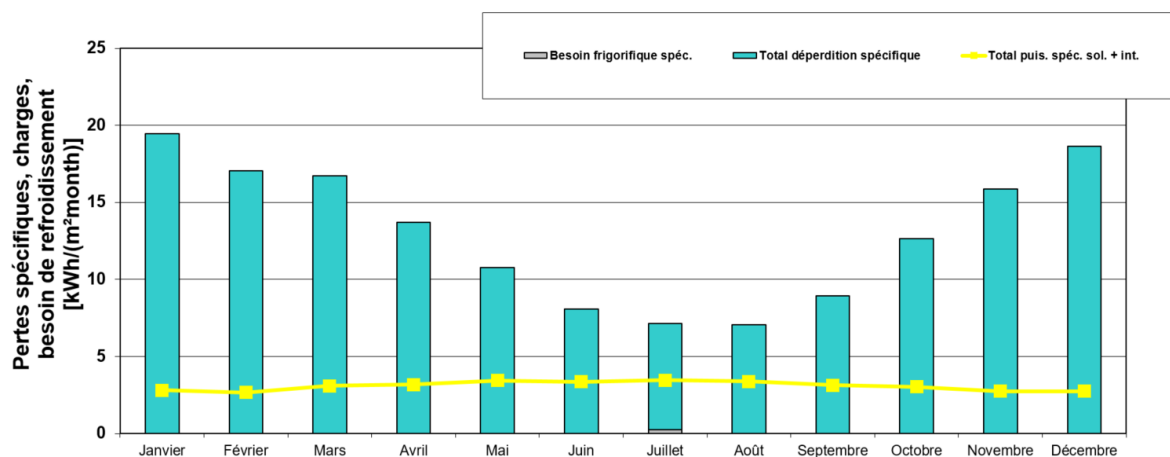


Figure 5-43 Besoin de refroidissement NC2 – Reconstruction ossature bois passive+ (PHPP)

Au niveau du besoin en eau chaude sanitaire (ECS), la valeur obtenue, pour 30 occupants consommant en moyenne 25 litres d'eau par jour, est constante à 15600 kWh/a pour l'ensemble du bâtiment.

La dernière catégorie de consommation considérée est la consommation en électricité, qui est de 4089 kWh/a dans le cas de cette reconstruction en construction traditionnelle.

## 5.6.2 Analyse de cycle de vie

Comme mentionné dans l'explication du concept d'analyse de cycle de vie page 23, l'analyse de cycle de vie des configurations d'étude se fait sur une durée de vie de 50 ans. Les impacts du bâtiment sur le réchauffement climatique, l'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux et la consommation en énergie primaire sont étudiés.

### *Le réchauffement climatique*

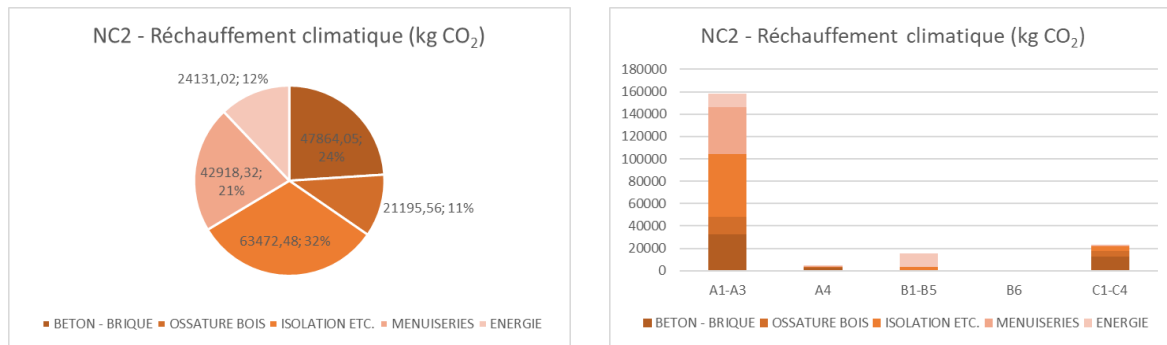


Figure 5-44 ACV NC2 – Réchauffement climatique

### *L'acidification des sols*

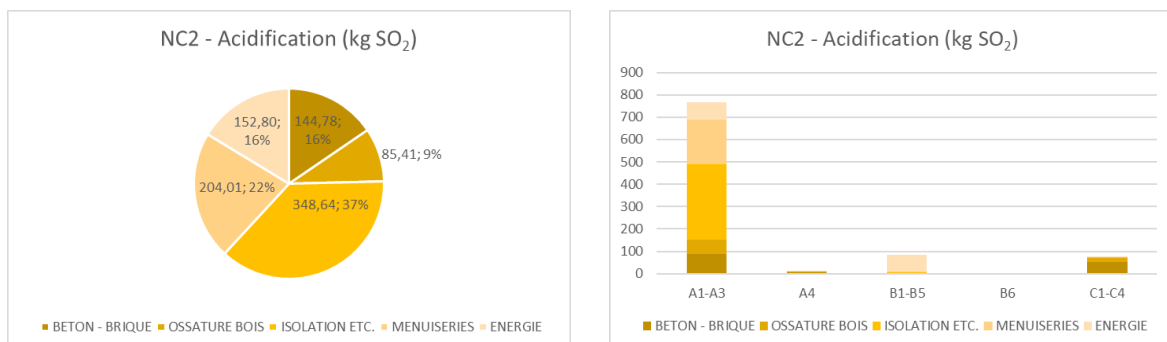


Figure 5-45 ACV NC2 – Acidification des sols

### *L'eutrophisation des eaux*

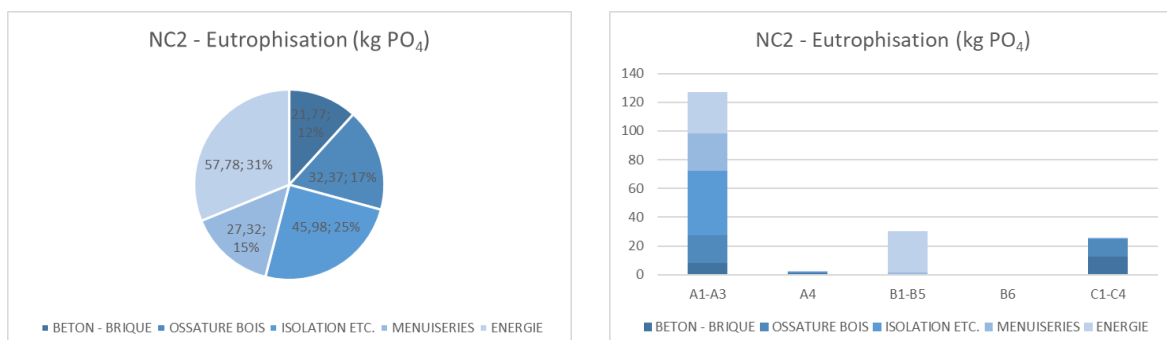


Figure 5-46 ACV NC2 – Eutrophisation des eaux

## La consommation en énergie primaire

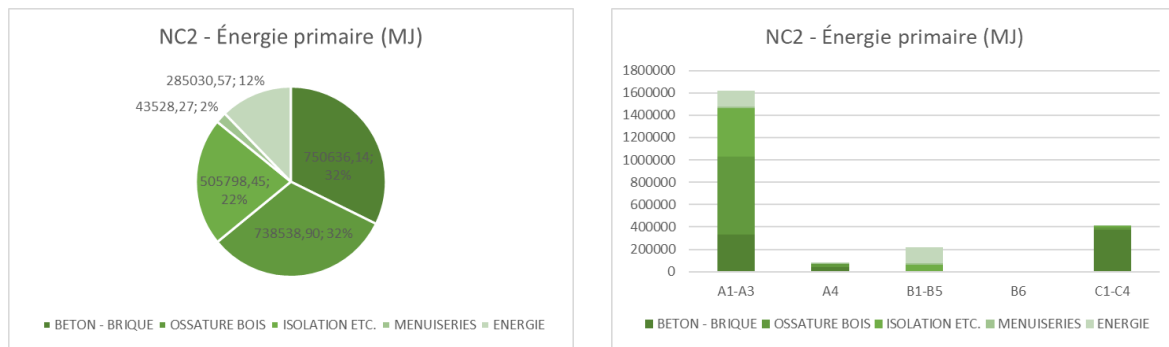


Figure 5-47 ACV NC2 – Consommation en énergie primaire

La sixième configuration d'étude traite le cas d'une reconstruction passive en ossature bois. On remarque sur les Figure 5-44, Figure 5-45, Figure 5-46 et Figure 5-47 que la phase B6 de l'analyse de cycle de vie, la consommation énergétique, n'impacte à nouveau plus les différents facteurs. Cela est dû à l'intégration au bâtiment de panneaux solaires thermiques et photovoltaïques afin de couvrir les demandes en chauffage et électricité. La contribution environnementale de ces panneaux est alors retrouvée dans les phases A1-A3 (construction), B1-B5 (remplacement) et C1-C4 (fin de vie).

On remarque aussi que les impacts les plus significatifs viennent des éléments de maçonnerie en béton ou en briques pour la déconstruction, et des éléments d'ossature en bois pour la phase de construction. La production des panneaux solaires aura quant à elle un effet plus marqué sur l'eutrophisation des eaux, comme on peut le voir à la Figure 5-46.



## 5.6.3 Étude des coûts

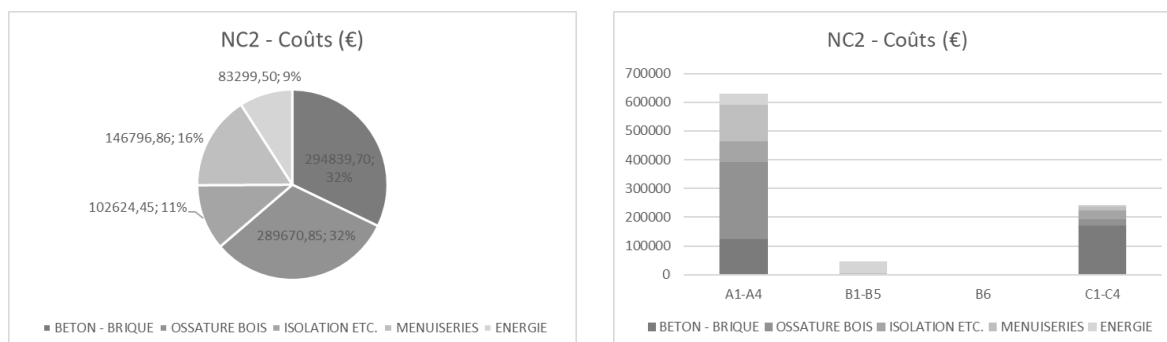


Figure 5-48 NC2 – Étude des coûts

Dans le cas de cette sixième configuration d'étude traitant d'une reconstruction en ossature bois passive, on remarque sur le graphique de gauche de la Figure 5-48 que la consommation énergétique du bâtiment ne compte plus que pour 9% des coûts de cycle de vie du bâtiment, répartis majoritairement sur les phases de construction et de rénovation et plus sur la phase de consommation. Aussi, les éléments en béton et en briques représentent la majeure partie des coûts de reconstruction et de démolition avec plus de 32% du coût global, à l'identique des éléments d'ossature en bois.

Une part importante de 16% des coûts est également consacrée aux menuiseries en triple vitrage isolant.

Les coûts globaux valent pour cette sixième et dernière configuration, pour une durée de vie de 50 ans, **917 231,36 euros**, soit plus cher que chacune des configurations précédentes. La reconstruction complète d'un bâtiment représente donc un investissement qui devra être étudié à plus long terme afin de déterminer à partir de quelle durée de vie il devient rentable. Cela sera fait au chapitre suivant.

## 5.6.4 Tableau récapitulatif des catégories d'impact d'ACV

Indicateurs environnementaux sur 50 ans		Réchauffement climatique (kg CO2)	Acidification (kg SO2)	Eutrophisation (kg PO4)	Énergie primaire (MJ)	Coûts (€)
<b>NC2</b>	Reconstruction ossature bois passive+	199581,43	935,64	185,22	2323532,33	917231,36

# 6

## RÉSULTATS COMPARATIFS

---

Ce chapitre synthétise et compare de manière objective les résultats obtenus au chapitre précédent, au moyen des outils d'analyse de cycle de vie des différentes configurations, ainsi que des bilans des coûts de cycle de vie. Il permet de répondre à la troisième question posée dans l'introduction.

### **3. Comment évoluent les impacts d'une rénovation ou d'une reconstruction passive à long terme ?**

Ces résultats sont, dans un premier temps, explicités sur la période de calcul de base de 50 ans de durée de vie du bâtiment, peu importe la configuration étudiée. Ils se composent d'une comparaison des indicateurs de cycle de vie des configurations à la fin de la période d'étude, avec leurs valeurs absolues et les pourcentages relatifs de ceux-ci par rapport au cas le plus défavorable.

Il vient ensuite une analyse approfondie des périodes de rentabilité économique des différentes configurations de manière évolutive sur la première période d'étude de 50 ans.

Ces résultats et la façon de les expliciter sont répétés par la suite dans deux sections, respectivement en prolongeant le temps d'étude jusqu'à 100 ans et 150 ans de durée de vie des configurations.

Les tableaux de calculs relatifs à l'établissement des résultats à long terme sont disponibles en Annexe VI.

## 6.1 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS SUR UNE DURÉE DE VIE DE 50 ANS

La configuration la plus défavorable sous chaque point de vue est la première, relative au cas du bâtiment existant. Comme on peut le constater sur la Figure 6-1, elle est de loin la plus néfaste pour l'environnement, pour le réchauffement climatique, et pour la qualité des eaux et des sols.

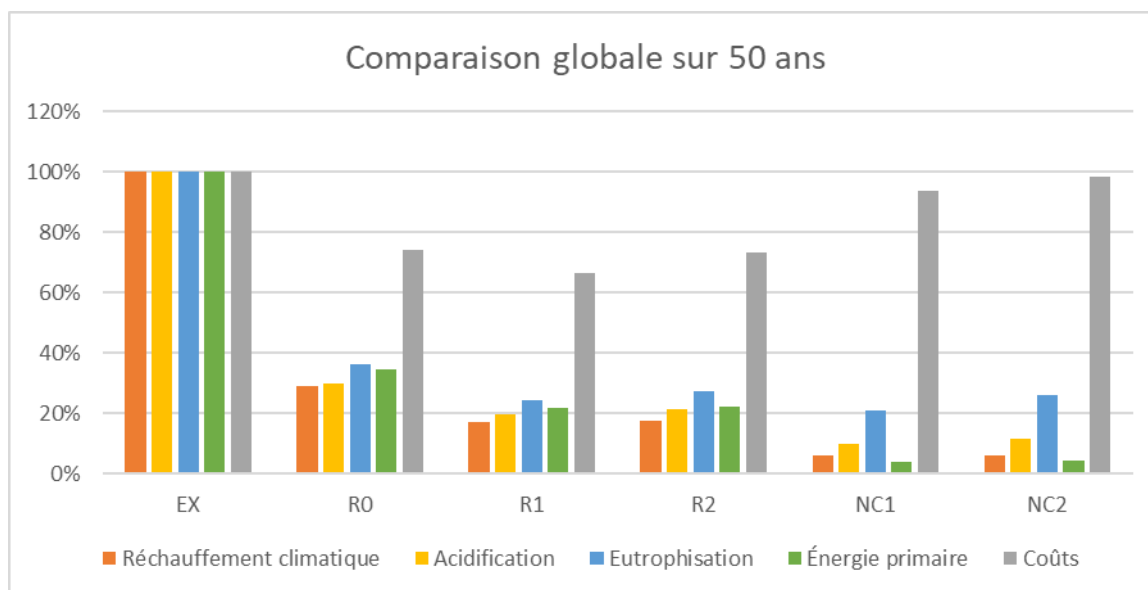


Figure 6-1 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 50 ans

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	100%	100%	100%	100%	100%
<b>R0</b>	29%	30%	36%	35%	74%
<b>R1</b>	17%	20%	25%	22%	66%
<b>R2</b>	18%	22%	28%	22%	73%
<b>NC1</b>	6%	10%	21%	4%	94%
<b>NC2</b>	6%	12%	26%	4%	99%

Tableau 6-1 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 50 ans

D'un point de vue environnemental, on constate que la situation s'améliore plus on avance dans l'investissement de rénovation de chacune des configurations. Le cas initial représente 100% des émissions relatives, la rénovation minimaliste environ 30%, les rénovations passives environ 20% et les reconstructions passives environ 10%. L'évolution est encore plus favorable si on s'intéresse en particulier au réchauffement climatique et à la consommation en énergie primaire. Les cas de reconstruction comptent en effet pour environ 5% de la valeur relative au bâtiment existant.

D'un point de vue économique, on constate que tous les cas de rénovation ou de reconstruction atteignent, sur une durée de vie de 50 ans, un coût de revient inférieur au cas

existant. On remarque aussi que, dans cette étude à moyen terme, une situation de rénovation est plus avantageuse qu'une reconstruction. Il sera intéressant de comparer à nouveau ces différents cas à long terme et à très long terme afin de confirmer la tendance.

Selon chacun des points de vue, on ne remarque pas dans les chiffres obtenus et présentés dans le Tableau 6-2, de différence marquée entre les différents types de construction d'une même catégorie de rénovation, que ce soit dans le cas d'une rénovation ou d'une reconstruction.

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	3360550,42	7974,76	706,43	52209509,80	931017,79
<b>R0</b>	972812,20	2403,46	255,77	18014783,55	690661,46
<b>R1</b>	585034,52	1571,79	173,47	11377895,40	619032,81
<b>R2</b>	596348,57	1714,93	194,78	11670107,07	681880,14
<b>NC1</b>	209659,17	789,94	148,65	2132598,49	874896,52
<b>NC2</b>	199581,43	935,64	185,22	2323532,33	917231,36

Tableau 6-2 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 50 ans

Afin d'étudier plus précisément la question de rentabilité économique des différentes configurations d'étude de ce travail, il est intéressant de tracer une courbe de l'évolution des coûts futurs relatifs à chacun des cas étudiés.

La Figure 6-2 reprend cette évolution, à partir de l'état actuel du bâtiment existant en l'année 0, jusqu'à la couverture des coûts de fin de vie en l'année 50. Un pas de 5 années est ici appliqué pour plus de lisibilité sur l'ensemble du graphique.

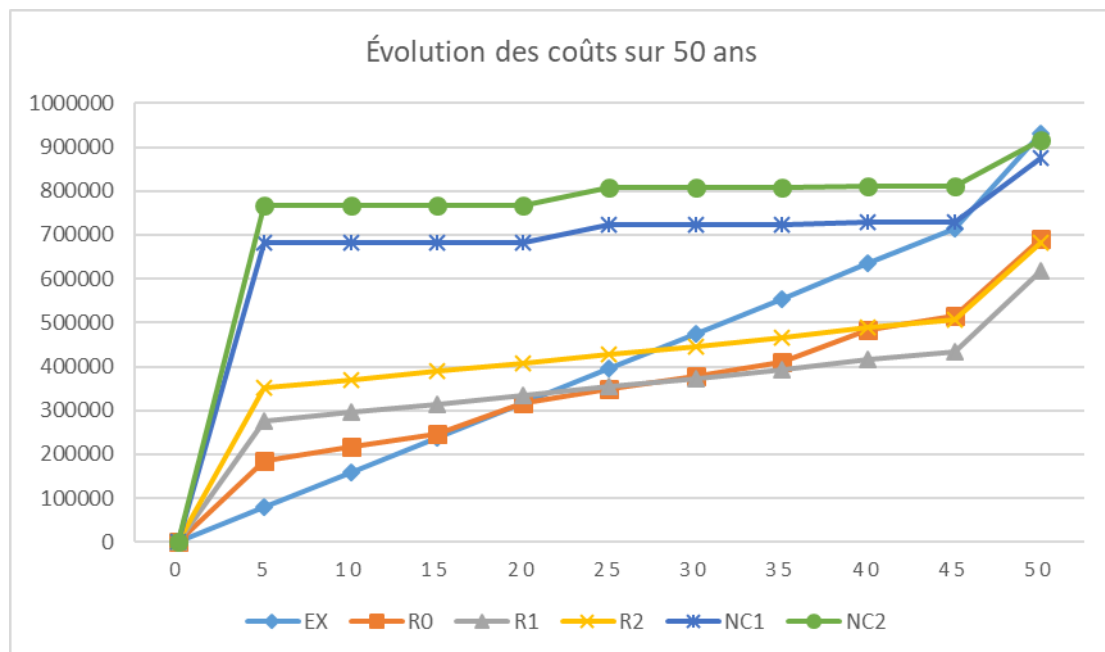


Figure 6-2 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 50 ans

On peut constater que l'utilisation du bâtiment existant tel quel reste économiquement rentable durant les 15 premières années. Le cas de la rénovation minimaliste prend ensuite

l'avantage jusqu'à 20 ans et accuse un coût total relativement similaire à la rénovation traditionnelle passive entre 20 ans et 35 ans d'utilisation.

Après 35 ans d'utilisation, c'est cette rénovation traditionnelle passive qui devient économiquement la plus rentable, suivie de près par la rénovation minimaliste et la rénovation passive en ossature bois.

On notera quand même que le coût de revient d'une reconstruction, sur 50 ans, est inférieur au coût de fonctionnement du bâtiment dans son état initial. Il est donc, dans tous les cas, rentable d'effectuer des travaux sur cette période afin de réduire ses dépenses.

Cette tendance va encore s'accroître avec le temps, comme on peut le constater aux pages suivantes.

## 6.2 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS SUR UNE DURÉE DE VIE DE 100 ANS

La configuration la plus défavorable sous chaque point de vue est toujours la première, relative au cas du bâtiment existant. Comme on peut le constater sur la Figure 6-3, elle est de loin la plus néfaste pour l'environnement, pour le réchauffement climatique, et pour la qualité des eaux et des sols.

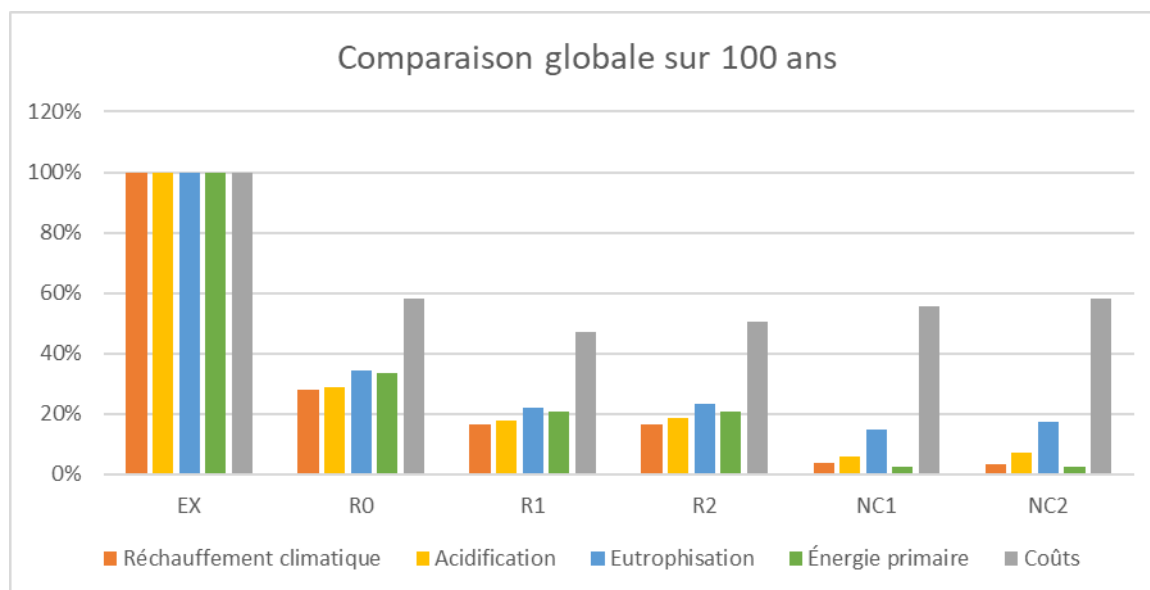


Figure 6-3 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 100 ans

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	100%	100%	100%	100%	100%
<b>R0</b>	28%	29%	34%	34%	58%
<b>R1</b>	16%	18%	22%	21%	47%
<b>R2</b>	16%	18%	23%	21%	51%
<b>NC1</b>	4%	6%	15%	2%	56%
<b>NC2</b>	3%	7%	17%	3%	58%

Tableau 6-3 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 100 ans

D'un point de vue environnemental, on constate que la situation s'améliore plus on avance dans l'investissement de rénovation de chacune des configurations. Le cas initial représente 100% des émissions relatives, la rénovation minimaliste environ 30%, les rénovations passives environ 20% et les reconstructions passives en moyenne moins de 10%. L'évolution est encore plus favorable si on s'intéresse en particulier au réchauffement climatique et à la consommation en énergie primaire. Les cas de reconstruction comptent en effet pour environ 3% de la valeur relative au bâtiment existant.

D'un point de vue économique, on constate que tous les cas de rénovation ou de reconstruction atteignent, sur une durée de vie de 100 ans, un coût de revient inférieur au cas

existant. On remarque aussi que, à long terme, les situations de rénovation ou de reconstruction ont des coûts relativement similaires avoisinant les 50% de ceux du cas existant. Il sera intéressant de comparer à nouveau ces différents cas à très long terme afin de confirmer ou infirmer la tendance.

Selon chacun des points de vue, on ne remarque pas dans les chiffres obtenus et présentés dans le Tableau 6-4, de différence marquée entre les différents types de construction d'une même catégorie de rénovation, que ce soit dans le cas d'une rénovation ou d'une reconstruction.

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	6700281,40	15894,17	1401,03	104021523,95	1719392,76
<b>R0</b>	1882167,85	4596,90	479,79	34993800,64	997833,93
<b>R1</b>	1092380,62	2802,93	305,39	21422205,18	808819,29
<b>R2</b>	1090793,12	2915,81	324,33	21540068,67	869518,34
<b>NC1</b>	235147,61	952,22	208,66	2420749,86	958196,02
<b>NC2</b>	223712,45	1088,44	243,00	2608562,90	1000530,86

Tableau 6-4 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 100 ans

Afin d'étudier plus précisément la question de rentabilité économique des différentes configurations d'étude de ce travail, il est intéressant de tracer une courbe de l'évolution des coûts futurs relatifs à chacun des cas étudiés après la seconde période de 100 ans.

La Tableau 6-4 reprend cette évolution à partir de l'année 50 jusqu'à la couverture des coûts de fin de vie en l'année 100. Ces coûts de fin de vie, au préalable pris en compte après 50 ans, ont été déplacés à l'année 100.

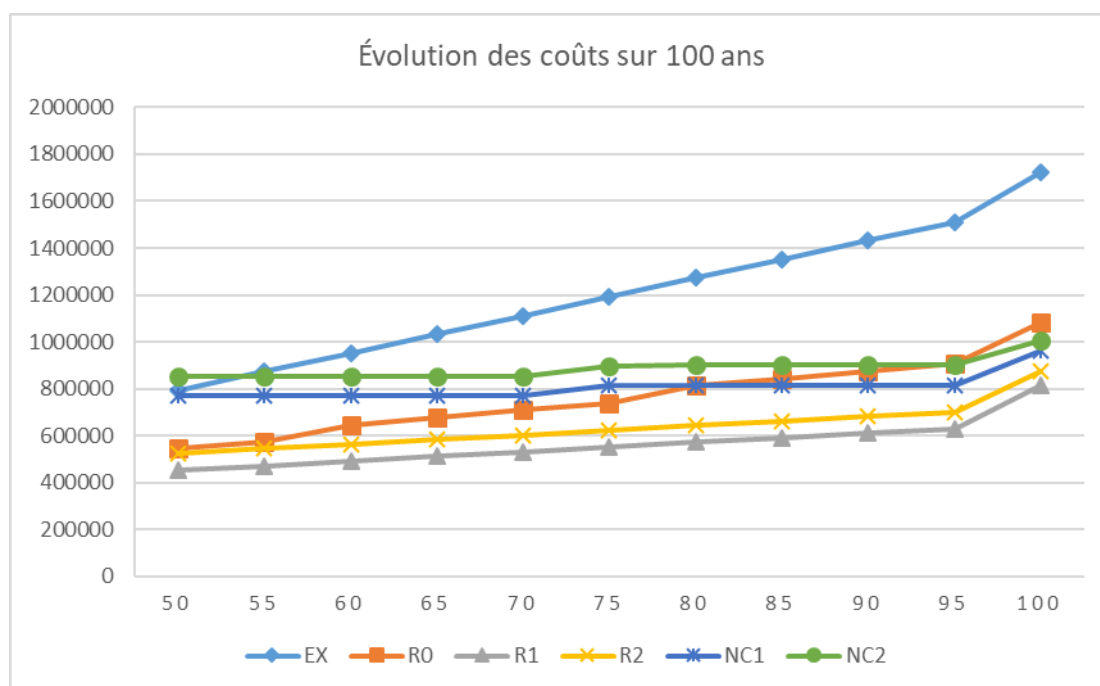


Figure 6-4 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 100 ans

On peut constater que l'utilisation du bâtiment existant tel quel n'est économiquement plus rentable du tout. Le cas de la rénovation minimaliste quant à lui perd aussi de son attrait avec le temps qui passe. Après 80 ans, il est même plus cher qu'une reconstruction du bâtiment.

Sur l'ensemble de cette période d'utilisation à long terme, ce sont les configurations de rénovations passives qui sont les plus rentables. Les cas de reconstructions, de par leur très faible consommation, deviennent de plus en plus intéressants mais doivent encore amortir leur coût initial très élevé.



## 6.3 COMPARAISON DES DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS SUR UNE DURÉE DE VIE DE 150 ANS

La configuration la plus défavorable sous chaque point de vue est toujours la première, relative au cas du bâtiment existant. Comme on peut le constater sur la Figure 6-5, elle est de loin la plus néfaste pour l'environnement, pour le réchauffement climatique, et pour la qualité des eaux et des sols.

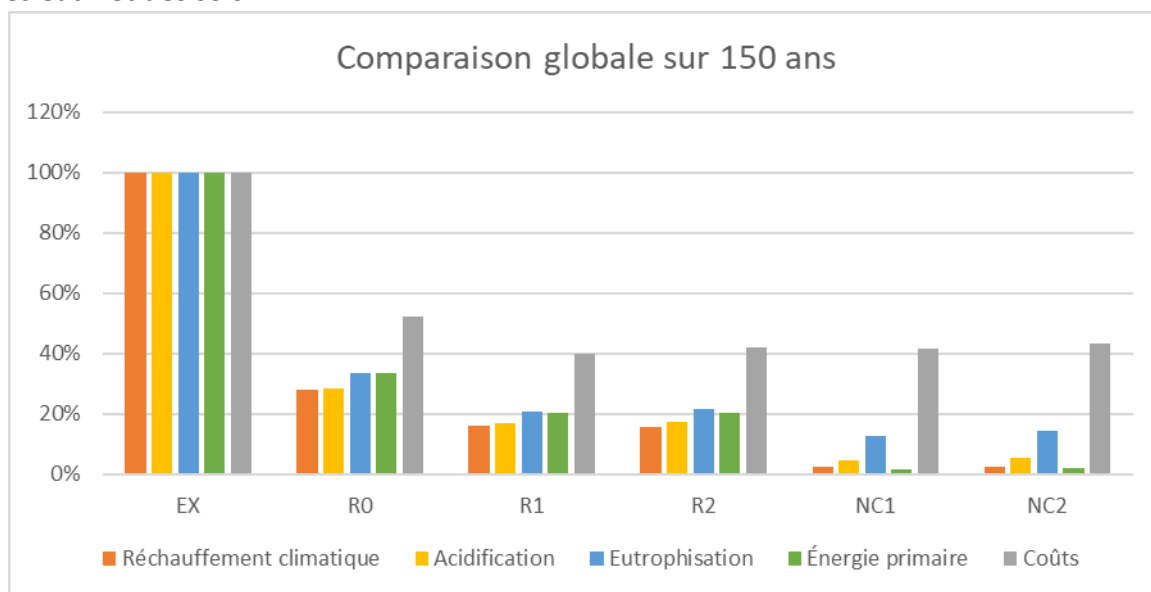


Figure 6-5 Comparaison des indicateurs environnementaux des configurations sur 150 ans

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	100%	100%	100%	100%	100%
<b>R0</b>	28%	29%	34%	33%	52%
<b>R1</b>	16%	17%	21%	20%	40%
<b>R2</b>	16%	17%	22%	20%	42%
<b>NC1</b>	3%	5%	13%	2%	42%
<b>NC2</b>	2%	5%	14%	2%	43%

Tableau 6-5 Pourcentages relatifs des indicateurs environnementaux des différentes configurations sur 150 ans

D'un point de vue environnemental, on constate que la situation s'améliore plus on avance dans l'investissement de rénovation de chacune des configurations. Le cas initial représente 100% des émissions relatives, la rénovation minimaliste environ 30%, les rénovations passives environ 18% et les reconstructions passives environ 10%. L'évolution est encore plus favorable si on s'intéresse en particulier au réchauffement climatique et à la consommation en énergie primaire. Les cas de reconstruction comptent en effet pour environ 2,5% de la valeur relative au bâtiment existant.

D'un point de vue économique, on constate que tous les cas de rénovation ou de reconstruction atteignent, sur une durée de vie de 150 ans, un coût de revient inférieur au cas

existant. On remarque aussi que, dans cette étude à très long terme, une situation de rénovation ou de reconstruction passive est plus avantageuse qu'une situation de rénovation minimaliste, avec environ 20% d'économies.

Selon chacun des points de vue, on ne remarque pas dans les chiffres obtenus et présentés dans le Tableau 6-6, de différence marquée entre les différents types de construction d'une même catégorie de rénovation, que ce soit dans le cas d'une rénovation ou d'une reconstruction.

	Réchauffement climatique	Acidification	Eutrophisation	Énergie primaire	Coûts
<b>EX</b>	10040012,38	23813,58	2095,63	155833538,10	2507767,73
<b>R0</b>	2791523,50	6790,34	703,81	51972817,73	1305006,40
<b>R1</b>	1599726,72	4034,07	437,31	31466514,96	998605,78
<b>R2</b>	1585237,67	4116,68	453,89	31410030,28	1057156,53
<b>NC1</b>	260636,05	1114,50	268,67	2708901,23	1041495,52
<b>NC2</b>	247843,47	1241,24	300,78	2893593,47	1083830,36

Tableau 6-6 Valeurs globales des indicateurs environnementaux des configurations sur 150 ans

Afin d'étudier plus précisément la question de rentabilité économique des différentes configurations d'étude de ce travail, il est intéressant de tracer une courbe de l'évolution des coûts futurs relatifs à chacun des cas étudiés après la première période de 50 ans.

La Figure 6-6 reprend cette évolution à partir de l'année 100 jusqu'à la couverture des coûts de fin de vie en l'année 150. Ces coûts de fin de vie, au préalable pris en compte après 50 ans et 100 ans, ont été déplacés à l'année 150.

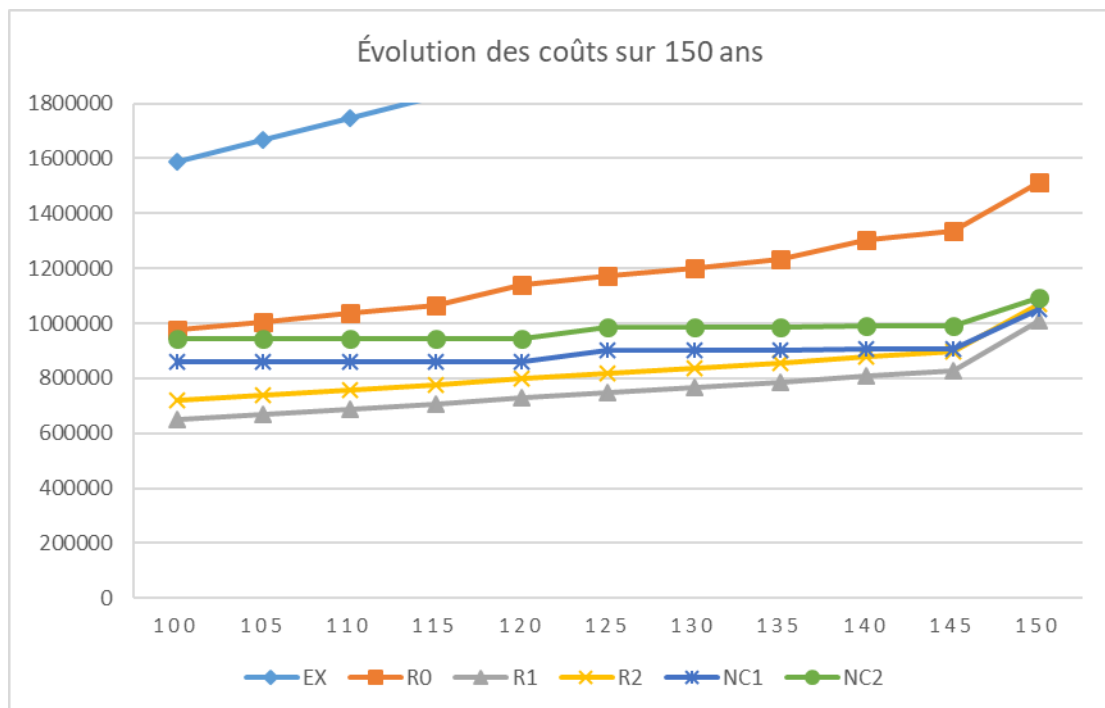


Figure 6-6 Évolution des coûts des configurations d'étude sur 150 ans

On peut constater que l'utilisation du bâtiment existant tel quel n'est économiquement plus rentable du tout. Il en va de même pour le cas de la rénovation minimaliste.

Sur l'ensemble de cette période d'utilisation à très long terme, ce sont les configurations de rénovations passives qui restent les plus rentables. Les cas de reconstructions, de par leur très faible consommation, deviennent de plus en plus intéressants et amortissent finalement leur coût initial élevé après cette longue période. Les coûts finaux de chacune des quatre configurations passives sont en effet très similaires après 150 ans de durée de vie du bâtiment.

# 7

## DISCUSSION

---

L'ensemble des graphes et autres tableaux présentés au chapitre précédent donne un rendu très objectif des résultats de ce travail de recherche. Ils manquent cependant d'une approche un peu plus personnelle de ceux-ci, mettant en relief certains points marquants ou certaines informations qui peuvent changer la façon de les interpréter.

Ce chapitre devrait permettre d'y voir plus clair au moyen du résumé des découvertes et des recommandations qui découlent de la recherche réalisée. Il vient ensuite l'ensemble des forces et des limitations de cette étude, et pour finir quelques éléments auxquels il est nécessaire d'être vigilant, en pratique, que ce soit en tant qu'ingénieur, architecte ou chercheur.

## 7.1 DÉCOUVERTES ET RECOMMANDATIONS

Comme on a pu le constater au chapitre précédent aux Figure 6-1, Figure 6-3 et Figure 6-5 reprenant les comparaisons des indicateurs de l'analyse de cycle de vie de chacune des configurations d'étude, investir dans des travaux de rénovation énergétique est toujours favorable à l'environnement. Je poursuis aussi dans ce sens en notant que, plus l'investissement amène à des performances énergétiques élevées et une valeur U moyenne des parois du bâtiment faible, plus l'impact environnemental du bâtiment à long terme sera faible, comme on pouvait également le constater sur les trois mêmes figures.

Un élément important non directement visible dans le chapitre des résultats est aussi à relever dans cette section. L'élément qui influence le plus négativement les indicateurs d'analyse de cycle de vie d'un bâtiment est la consommation en énergie de celui-ci, et a fortiori en énergies fossiles. C'est la raison principale pour laquelle la configuration concernant le bâtiment existant dans son état actuel est très vite dépassée. De plus, cette consommation amène un coût de fonctionnement très lourd à court, moyen et long terme.

Une première recommandation est donc d'actualité à ce stade. Si on est confronté, à la fin d'un processus de comparaison entre deux possibilités de rénovation ou de reconstruction relatives à un bâtiment, à deux cas similaires d'un point de vue des impacts environnementaux et du budget sur une période d'étude donnée, il est préférable de favoriser celui qui a la consommation énergétique la plus faible, ou du moins celui qui a la consommation en énergies fossiles la plus faible.

Si on s'intéresse au coût de fonctionnement uniquement, on remarquera que les cas de reconstruction passive sont les plus intéressants. Ils ont cependant un coût d'investissement très conséquent qui, comme on a pu le constater jusqu'à la Figure 6-6, prend environ 150 ans à être rentabilisé.

C'est ici qu'une appréciation plus subjective des résultats est la bienvenue. Cette étude ne prend pas en compte dans les calculs financiers de rentabilité la valeur de revente du bien immobilier. On considère en effet que le bâtiment sera utilisé jusqu'à sa fin de vie par le même propriétaire, alors qu'une reconstruction pourrait profiter à quelqu'un d'autre, et donc permettre de rentabiliser l'investissement effectué par le propriétaire initial.

Une seconde recommandation est donc liée à la valeur finale du bâtiment. Lorsque deux possibilités se présentent, la première de rénover en respectant les normes passives un bâtiment vétuste et la seconde de reconstruire, pour un budget similaire, un bâtiment passif, il vaut mieux reconstruire afin de rétablir des bases saines et d'apporter une plus-value à la valeur de son bien immobilier. Le processus de rénovation, plus économique en termes de consommation de matières premières, pourra alors être reporté à la prochaine phase de vie de la nouvelle construction si la structure est conservée dans un état acceptable.

D'un autre côté, les coûts de l'électricité des cas de reconstruction, suite à l'intégration de panneaux solaires, sont moindres que via le réseau traditionnel, mais pas de manière nette sans primes ou revente au réseau. Ces deux éléments, également non pris en compte dans cette étude, qui pourraient encore faire pencher la balance de la rentabilité économique en faveur des cas de reconstruction passive.

Une troisième recommandation peut ainsi être énoncée. Lorsque le choix est possible, il est préférable de favoriser le projet de rénovation ou de reconstruction qui intègre le plus de technologies d'autoproduction d'énergie. Il est également judicieux d'être attentif aux éventuelles périodes durant lesquelles des aides et des primes à l'énergie verte peuvent être octroyées par l'état, comme c'était le cas avec les certificats verts ou la prime *Qualiwatt* en Wallonie jusqu'en 2018.

## 7.2 FORCES et LIMITATIONS DE L'ÉTUDE

La méthodologie de recherche de ce travail se base sur des techniques d'analyse et de coût de cycle de vie toutes deux déjà beaucoup utilisées lors de travaux antérieurs. Cela permet d'avoir une définition des normes, des hypothèses et autres balises de travail à respecter déjà bien établies au préalable, et une fiabilité des résultats qui n'est plus à prouver lorsque ces dernières sont respectées.

Aussi, ce travail de recherche se base sur un cas d'étude existant, ce qui lui donne plus de poids, et permet d'asseoir des bases de travail plus saines et plus réalistes que si le même travail avait été réalisé sur un cas d'étude fictif. Le réalisme de la recherche la rend également plus propice à trouver son utilité auprès du public concerné, à savoir d'éventuels maîtres d'ouvrage en quête de rentabilité économique, ou des maîtres d'œuvre en quête d'inspiration et de travail en amont similaire au leur.

L'utilisation du logiciel *One Click LCA* était selon moi le choix le plus judicieux afin d'effectuer des analyses de cycle de vie complètes sur des bâtiments entiers, en comparaison avec d'autres logiciels étudiant les matériaux au cas par cas, en termes d'efficacité de travail et de gain de temps. *One Click LCA* implique cependant une limitation importante dans la foulée. Les données disponibles dans les bases de données « traditionnelles », présentes au sein du logiciel, telles que *Ecoinvent* ou *Gabi* n'étant pas toujours suffisantes, une confiance a été accordée aux données génériques locales auto-calculées par le logiciel *One Click LCA*.

En relation directe avec l'utilisation de *One Click LCA* vient une autre limitation. Le programme a été utilisé pour sa capacité à traiter l'intégralité d'un bâtiment dans une étude d'analyse de cycle de vie complète, mais il ne comporte pas les fonctionnalités nécessaires pour gérer une rénovation et prendre en compte certaines phases du cycle de vie des matériaux uniquement. Le logiciel *One Click LCA* a donc été utilisé pour le calcul des indicateurs de chacun des matériaux, sur chacune des phases de leur ACV, et ces données ont

dû être récupérées, décomposées, et réassemblées manuellement par la suite pour isoler les périodes de vie impactant réellement les cas étudiés.

Malgré ces limitations, l'utilisation de ce logiciel d'ACV global fut un gain d'efficacité et de fiabilité des résultats, de par la vue globale constante de ceux-ci.

Les résultats de la recherche, et notamment la comparaison relative à la rentabilité économique des différentes configurations, dépendent fortement des coûts de l'énergie. Ces coûts sont quant à eux proportionnels à la quantité d'énergie consommée ainsi qu'à la façon de la produire, deux éléments sensibles quant à la fiabilité des résultats. Cela est le plus marqué dans le cas des bâtiments passifs, où la consommation interne des usagers compte pour plus que les besoins de chauffage et de refroidissement de l'ensemble du bâtiment.

D'un autre côté, on retrouve aussi une limite de la fiabilité des résultats de par l'évolution de certains paramètres dans le futur. Cela prévaut dans un premier temps pour l'évolution des coûts de l'énergie, et dans un second temps pour l'évolution des techniques de démontage, de recyclage et de réutilisation des divers matériaux impactant la construction. Ces données sont vouées à évoluer avec le temps, et donc à faire pencher la balance des résultats obtenus en suivant les valeurs financières et techniques actuelles.

Néanmoins, ce travail ne cherche pas à prédire les coûts exacts à terme, ou les contributions environnementales précises d'une configuration ou d'une autre, mais suit une approche comparative des résultats, ce qui lui apporte une grande force quant à la stabilité des conclusions. En effet, une erreur émise sur une variable d'une configuration d'étude, pour peu qu'elle soit utilisée dans chacune des configurations, est reportée en même proportion sur les autres configurations. La comparaison finale n'en sera donc que peu ou pas impactée.

## 7.3 EFFETS EN PRATIQUE ET POUR DE FUTURES RECHERCHES

En tant qu'architecte ou ingénieur-architecte, cette étude comparative de diverses améliorations d'un cas concret trouve son utilité à différents égards.

D'une part, elle offre une base de réflexion dans l'approche du projet à proposer au client. En suivant les résultats, et en fonction des motivations et des volontés d'une entreprise, l'architecte pourra alors proposer des projets de rénovation ou de reconstruction au cas par cas, en se basant sur des études similaires à celle-ci. Ce mémoire a pour but d'informer le public de chefs d'entreprises, d'ingénieurs et d'architectes qu'il cible afin de leur faciliter la prise de décision au moyen de l'analyse comparative.

D'autre part, ce travail distingue deux procédés de construction et en dévoile les résultats tant environnementaux que financiers. Cela offre déjà une piste de réflexion quant au type de construction à envisager en fonction des demandes, du savoir-faire des équipes de conception et de construction, et des coûts des matériaux du moment.

C'est là que des recherches complémentaires auraient, à mon sens, un grand rôle à jouer dans le futur de la conception passive tendant à minimiser les émissions durant l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, et pas seulement pendant sa période d'utilisation.

Une suite à cette étude serait donc de reprendre chacune des catégories de configurations d'étude, à savoir une rénovation minimaliste, une rénovation passive et une reconstruction passive plus, afin de démultiplier chacune de ces catégories en diverses méthodes de construction, faisant également intervenir des matériaux biosourcés ou innovants récemment mis à jour.

Ce travail donnerait alors un plus grand panel de résultats disponibles en préambule à tout projet de reconstruction ou de rénovation énergétique. Je ne me suis ici concentré que sur deux cas distincts par catégorie de rénovation afin de respecter le temps qui m'était donné pour réaliser ce mémoire, mais ce sujet de recherche est loin d'être clôturé.



# 8

## CONCLUSION

---

L'objectif de ce mémoire était de répondre à la question : « **Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire ?** ». Cette question est vaste, et fait entrer en ligne de compte un grand nombre de facteurs. La complexité de ceux-ci, ainsi que la diversité des projets d'architecture ne permettent pas d'y répondre de manière directe et unique, mais plutôt via une approche comparative et des propos nuancés.

Lorsque les fondations et la structure du bâtiment sont saines, il est plus intéressant de rénover celui-ci afin de l'amener aux normes passives. Cela constitue un gain en matériaux, en temps de travail et au final en coût, en tous cas à court et moyen terme. Si le besoin est temporaire, une rénovation de type minimaliste peut suffire à améliorer pour une ou deux dizaines d'années l'empreinte environnementale et économique d'un bâtiment, dans l'attente de le voir être remplacé par la suite.

Dans le cas contraire, il faut démonter ou démolir l'existant, recycler ce qui peut l'être, et enfin reconstruire. La reconstruction, pour être optimale, doit prendre en compte l'ensemble des données actuelles du projet et optimiser la forme, les matériaux et les techniques constructives de la nouvelle construction à celles-ci. Mieux encore, l'idéal est de pouvoir anticiper sur les potentiels usages futurs de l'ouvrage, sur sa consommation, mais aussi sur sa future démontabilité et fin de vie.

Mieux encore, des phases de rénovations et de reconstruction, à très long terme, peuvent être perçues comme le cycle des vies d'un bâtiment donné, s'adaptant aux besoins et aux technologies de son époque, se laissant être remplacé par un modèle plus respectueux de l'environnement que lui quand le temps est venu.

Dans le chapitre consacré aux résultats de ce travail, on aura constaté qu'une nouvelle construction, énergétiquement et environnementalement très efficiente, représente un investissement conséquent qui peut voir de nombreuses années passer avant d'être rentabilisé. À cela je dirais qu'il faut, coûte que coûte, le faire.

Investir dans un immobilier plus durable apporte une plus-value à son bien, en augmente le confort d'utilisation, réduit sa consommation énergétique et minimise largement l'empreinte écologique qu'il laisse sur la planète. En sachant que le secteur de la construction représente à l'heure actuelle près de 50% de la consommation en matières premières et environ 40% des émissions de CO<sub>2</sub> des pays développés, cet investissement apparaît comme la possibilité d'un grand pas en avant, dans les années à venir, vers un ralentissement du réchauffement climatique et une sauvegarde, à long terme, de notre environnement actuel.

# BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

---

- Anderson, J., & Moncaster, A. (2020). *Embodied carbon of concrete in buildings, Part 1 : Analysis of published EPD*. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/341943113\\_Embodied\\_carbon\\_of\\_concrete\\_in\\_buildings\\_Part\\_1\\_analysis\\_of\\_published\\_EP](https://www.researchgate.net/publication/341943113_Embodied_carbon_of_concrete_in_buildings_Part_1_analysis_of_published_EP)
- Attia, S. (2018a). Performance Comparison and Quantification. In S. Attia (Éd.), *Regenerative and Positive Impact Architecture : Learning from Case Studies* (p. 61-80). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66718-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66718-8_7)
- Attia, S. (2018b). *Regenerative and Positive Impact Architecture : Learning from Case Studies*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66718-8>
- Attia, S. (2019). *Technique de construction durable des bâtiments : III*.
- Brundtland, G. H. (1987). *Rapport Brundtland*. 349.
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a Global Carbon Sink. *Springer Nature Sustainability Community*. <https://sustainabilitycommunity.springernature.com/posts/59221-buildings-as-a-global-carbon-sink>
- Commission européenne. (2016, novembre 23). *Les effets du changement climatique* [Text]. Action Pour Le Climat - European Commission. [https://ec.europa.eu/clima/change/consequences\\_fr](https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_fr)
- CSTC. (2020). . : *EPBD* .: [http://www.epbd.be/index.cfm?n01=home\\_page](http://www.epbd.be/index.cfm?n01=home_page)

- Deshayes, P. (2012). Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : Logiques d'innovation et/ou problématiques du changement. *Innovations*, n°37(1), 219-236.
- Eurostat. (2020). *Eurostat—Data Explorer*.  
[http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg\\_pc\\_205&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_pc_205&lang=en)
- Gauvreau-Lemelin, C., & Attia, S. (2017). *Benchmarking the Environmental Impact of Green and Traditional Masonry Wall Constructions*. Heriot Watt University, Edinburgh.  
<https://orbi.uliege.be/handle/2268/212318>
- Hoyet, N. (2017). *Matériaux et architecture durable : Fabrication et transformations, propriétés physiques et architecturales, approche environnementale* (Édition enrichie des matériaux biosourcés.). Dunod.
- Informazout. (2017, juillet 13). *A propos du mazout*. Informazout.  
<https://informazout.be/fr/mazout/propos-de-mazout>
- ISO 14040. (2006). *ISO 14040:2006(fr), Management environnemental—Analyse du cycle de vie—Principes et cadre*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>
- ISO 15686. (2011). *ISO 15686-1:2011(fr), Bâtiments et biens immobiliers construits—Conception prenant en compte la durée de vie—Partie 1 : Principes généraux et cadre*.  
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15686:-1:ed-2:v1:fr>
- Janssen, A., Wastiels, L., & Delem, L. (2013). *Infofiche 64 : Analyse du cycle de vie ou LCA* • CSTC. Centre Scientifique et Technique de la Construction.  
<https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=infofiches&pag=64&lang=fr>
- Les Crises. (2013, avril 19). *1345 Climat (8) : Historique long et analyse du réchauffement climatique*. Les-Crises.fr. <https://www.les-crises.fr/climat-8-analyse-rechauffement/>

- Méquignon, M. (2012). Durée de vie et développement durable. *Les Cahiers de la recherche architecturale et urbaine*, 26/27, 225-232. <https://doi.org/10.4000/crau.587>
- PMP asbl. (2019). *Qu'est-ce qu'une maison passive ? - Plate-forme Maison Passive asbl.* <https://www.maisonpassive.be/?Qu-est-ce-qu-une-maison-passive-1588>
- PrixTravauxm<sup>2</sup>.com. (2020). *Prix des panneaux solaires au m2 en 2020.* <https://www.prix-travaux-m2.com/prix-panneaux-solaires.php>
- Reiter, S. (2010). *Life Cycle Assessment of Buildings – a review.* 19.
- Simonen, K. (2014). *Life Cycle Assessment.* Routledge.
- SPW Energie. (2017). *Exigences PEB à partir du 1er janvier 2021.* Site énergie du Service Public de Wallonie. <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-a-partir-du-1er-janvier-2021.html?IDC=7224&IDD=114100>
- Statbel. (2020). *Tarif officiel moyen des produits pétroliers en euros.* <https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/api/views/74d181b1-7074-4c9f-9a71-85303980d41f/result/PDF>
- Universalis, E. (1997). *Révolution industrielle.* Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/revolution-industrielle/>
- Université de Valenciennes. (2012). *ACVBAT. Démarche d'analyse du cycle de vie : principes, méthodologie, exemples d'application aux matériaux et éléments de construction.* [http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/accueil/co/acvbat\\_010\\_accueil.html](http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/accueil/co/acvbat_010_accueil.html)
- UPA. (2017). *Bordereau des prix unitaires 2017.* <https://upa-bua-arch.be/fr/ressources/le-bordereau-des-prix-unitaires/bordereaux-des-prix-unitaires-2020>
- Van Dessel, J., & Putzeys, K. (2007). *Construction durable : Bâtissons l'avenir !* « CSTC-Contact
- CSTC. Centre Scientifique et Technique de la Construction.

<https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact13&art=195>

# ANNEXES

---

I.	Labels passifs rencontrés .....	II
II.	Déclaration de conformité de One Click LCA .....	III
III.	Résistances superficielles des parois pour le calcul des valeurs U.....	IV
IV.	Plans des configurations d'étude .....	V
i.	EX – Bâtiment existant .....	V
ii.	R0 – Rénovation minimaliste .....	VI
iii.	R1 – Rénovation traditionnelle passive .....	VII
iv.	R2 – Rénovation ossature bois passive .....	VIII
v.	NC1 – Reconstruction traditionnelle passive plus .....	IX
vi.	NC2 – Reconstruction ossature bois passive plus .....	X
V.	Données sur 50 ans (Modélisation, ACV, ACCV) .....	XI
i.	EX – Bâtiment existant .....	XI
ii.	R0 – Rénovation minimaliste .....	XIII
iii.	R1 – Rénovation traditionnelle passive .....	XV
iv.	R2 – Rénovation ossature bois passive .....	XVII
v.	NC1 – Reconstruction traditionnelle passive plus .....	XIX
vi.	NC2 – Reconstruction ossature bois passive plus .....	XXI
VI.	Données évolutives à long terme .....	XXIII
i.	Sur 50 ans .....	XXIII
i.	Sur 100 ans .....	XXIV
i.	Sur 150 ans .....	XXVI

## I. LABELS PASSIFS RENCONTRÉS



### PASSIF RÉNOVATION



- **Critère de consommation en EPR** :  $80 \text{ kWh/m}^2_{\text{SRE}} \cdot \text{an}$
- **Critère de production en EPR** : aucun

Pour la rénovation, le critère de consommation en EPR est fixé à  $80 \text{ kWh/m}^2_{\text{SRE}} \cdot \text{an}$ . Aucune production d'énergie renouvelable n'est exigée. Cependant, et comme pour tous les autres labels, celle-ci peut permettre d'atteindre plus facilement le label si la réduction de la consommation en EPR s'avère être inatteignable pour raisons techniques ou économiques. Ainsi, une consommation en EPR de  $95 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$  peut être acceptée si un minimum d'EPR est produit à l'échelle du bâtiment.



### PASSIF PLUS



- **Critère de consommation en EPR** :  $45 \text{ kWh/m}^2_{\text{SRE}} \cdot \text{an}$
- **Critère de production en EPR** :  $60 \text{ kWh/m}^2_{\text{SOL}} \cdot \text{an}$

**Le Passif PLUS** place la barre un peu plus haut puisqu'il contraint davantage la consommation en énergie primaire renouvelable et exige un minimum de production d'énergie renouvelable à l'échelle du bâtiment. On pourrait l'assimiler à un bâtiment «zéro-énergie», bien que le critère de production d'ER de  $60 \text{ kWh/m}^2_{\text{SOL}} \cdot \text{an}$  ne compense pas nécessairement l'ensemble des consommations du bâtiment (selon la proportion de  $\text{m}^2$  au sol par rapport à la surface de référence énergétique totale).

Source : (PMP asbl, 2019)

## II. DÉCLARATION DE CONFORMITÉ DE ONE CLICK LCA



**Building Research Institute**

together to the future

00-611 Warsaw, Filtrowa 1

**Department of Thermal Physic, Sanitary Systems and Environment**

02-656 Warsaw, Ksawerów 21

### DECLARATION N<sup>o</sup> 031/2015

ITB hereby confirms that the software:

**360optimi<sup>®</sup> and One Click LCA<sup>™</sup> developed by Bionova Ltd**

has been audited and verified to be compliant with the following standards:

**EN 15978 Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings Calculation method**

**ISO 21931-1 Sustainability in building construction - Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works  
- Part 1: Buildings**

**ISO 21929-1 Sustainability in building construction - Sustainability indicators  
Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings**

Conformity with the above standards was verified in consideration of the data quality requirements of the following standards:

**ISO 14040 Environmental management - Life cycle assessment  
Principles and framework**

**EN 15804 Sustainability of construction works. Environmental product declarations.  
Core rules for the product category of construction products**

The software was found to be in conformance with the provisions and requirements of listed international standards

This declaration is valid from the date of issue for the year in which it is signed and 5 full calendar years after that

Head of the Department of  
Thermal Physic, Sanitary Systems  
and Environment

Robert Geryto, PhD



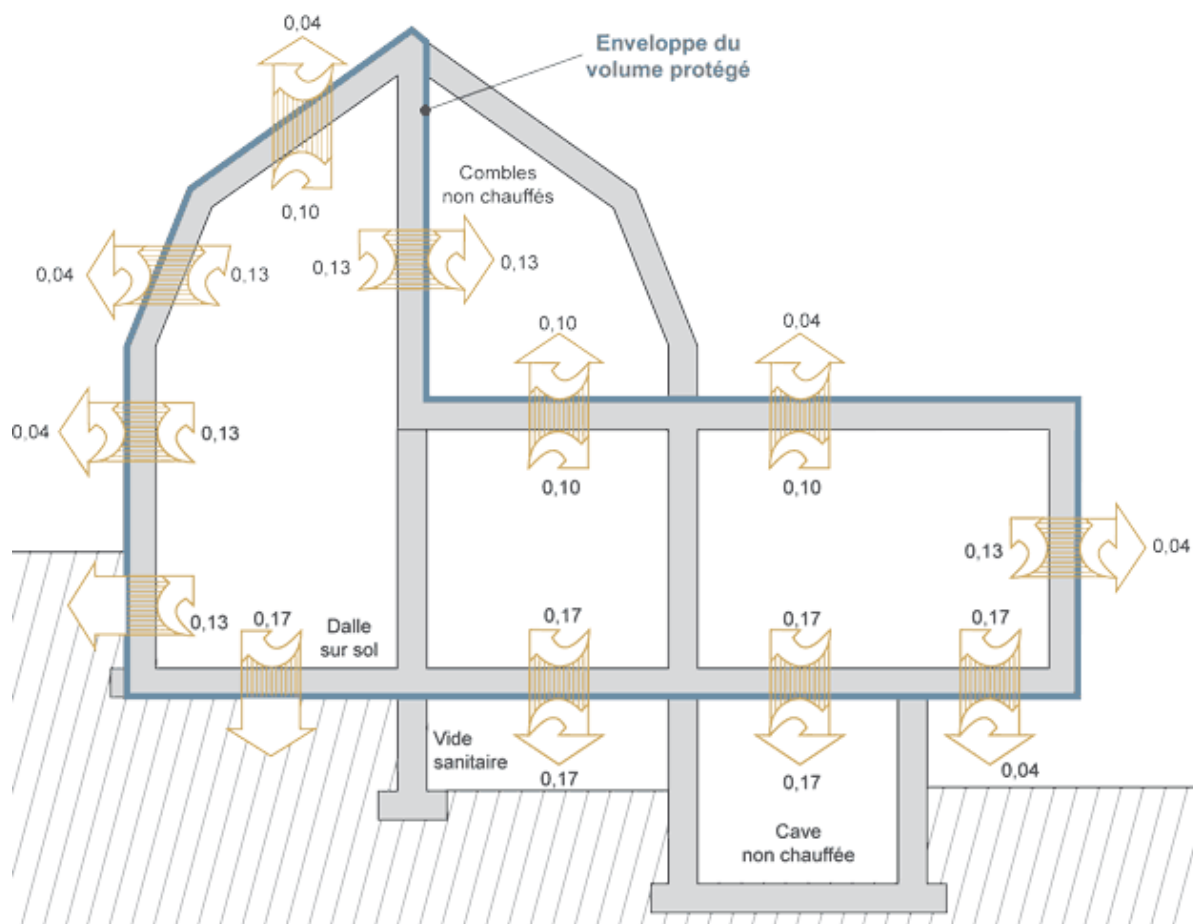
Deputy Director  
for Research and Development

Michał Wójtowicz, PhD

Warsaw, 1 April 2015 r.



### III. RÉSISTANCES SUPERFICIELLES DES PAROIS POUR LE CALCUL DES VALEURS U

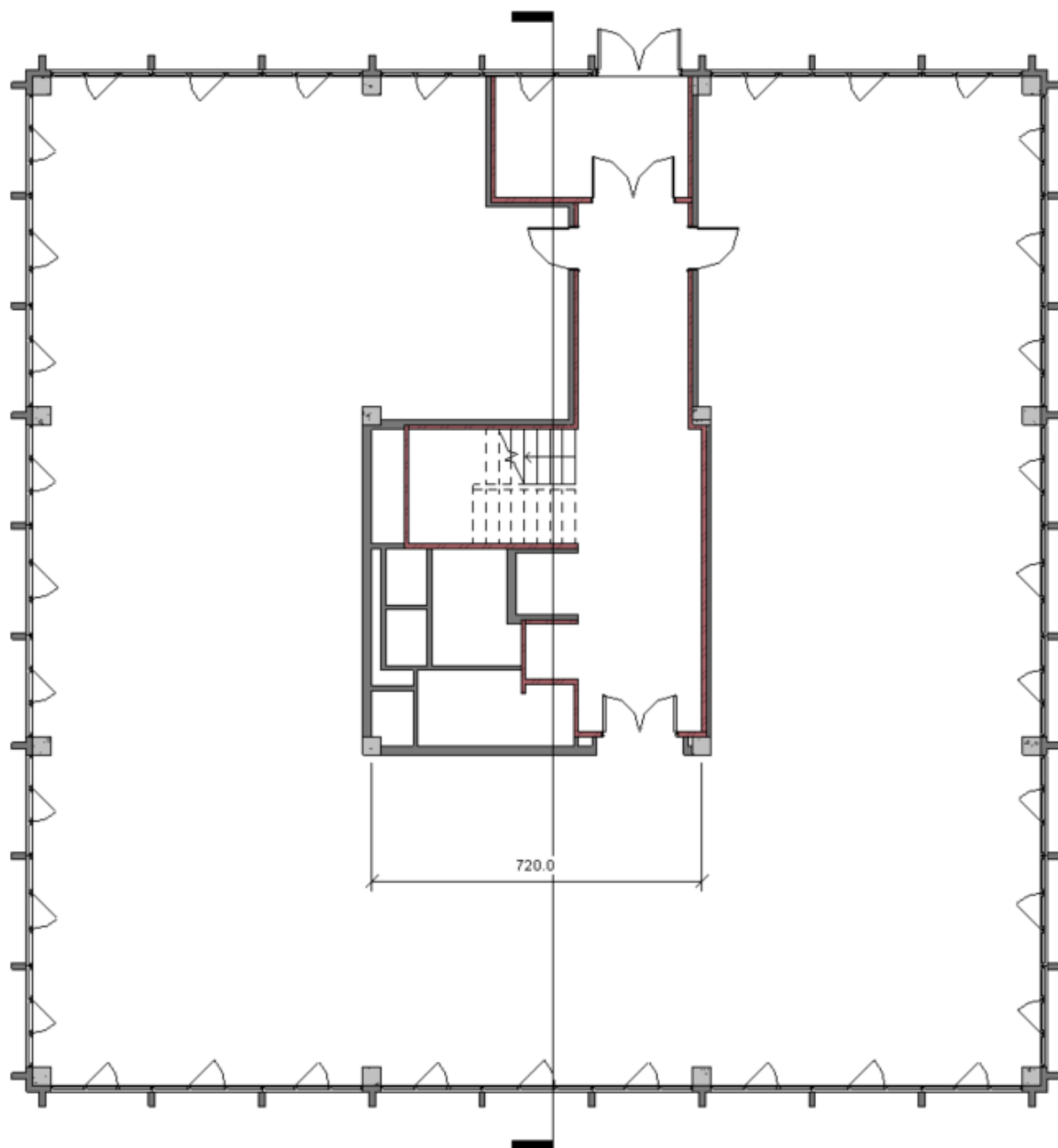


Source : (SPW Energie, 2018)

## IV. PLANS DES CONFIGURATIONS D'ÉTUDE

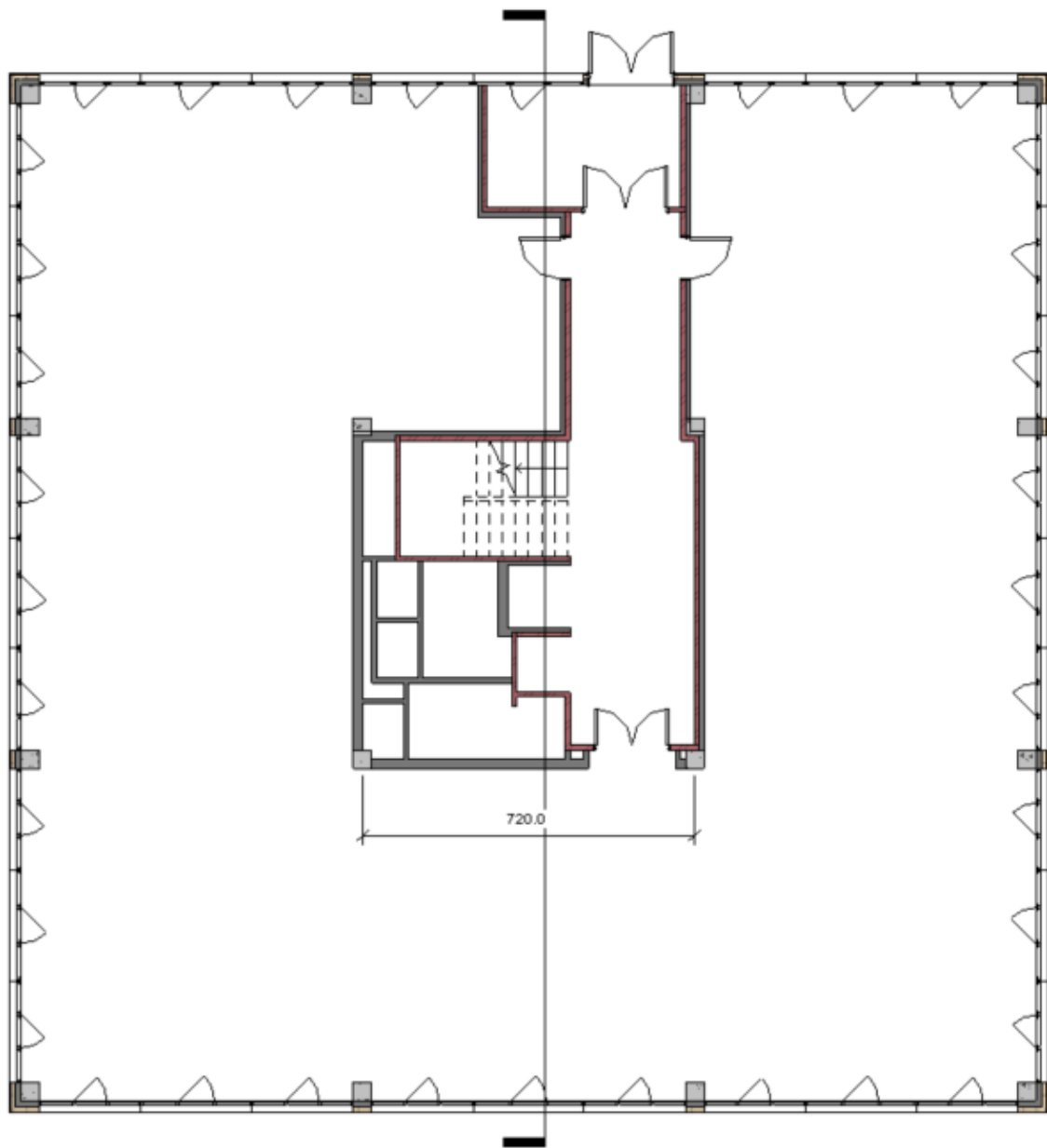
### i. EX – Bâtiment existant

Rez-de-chaussée



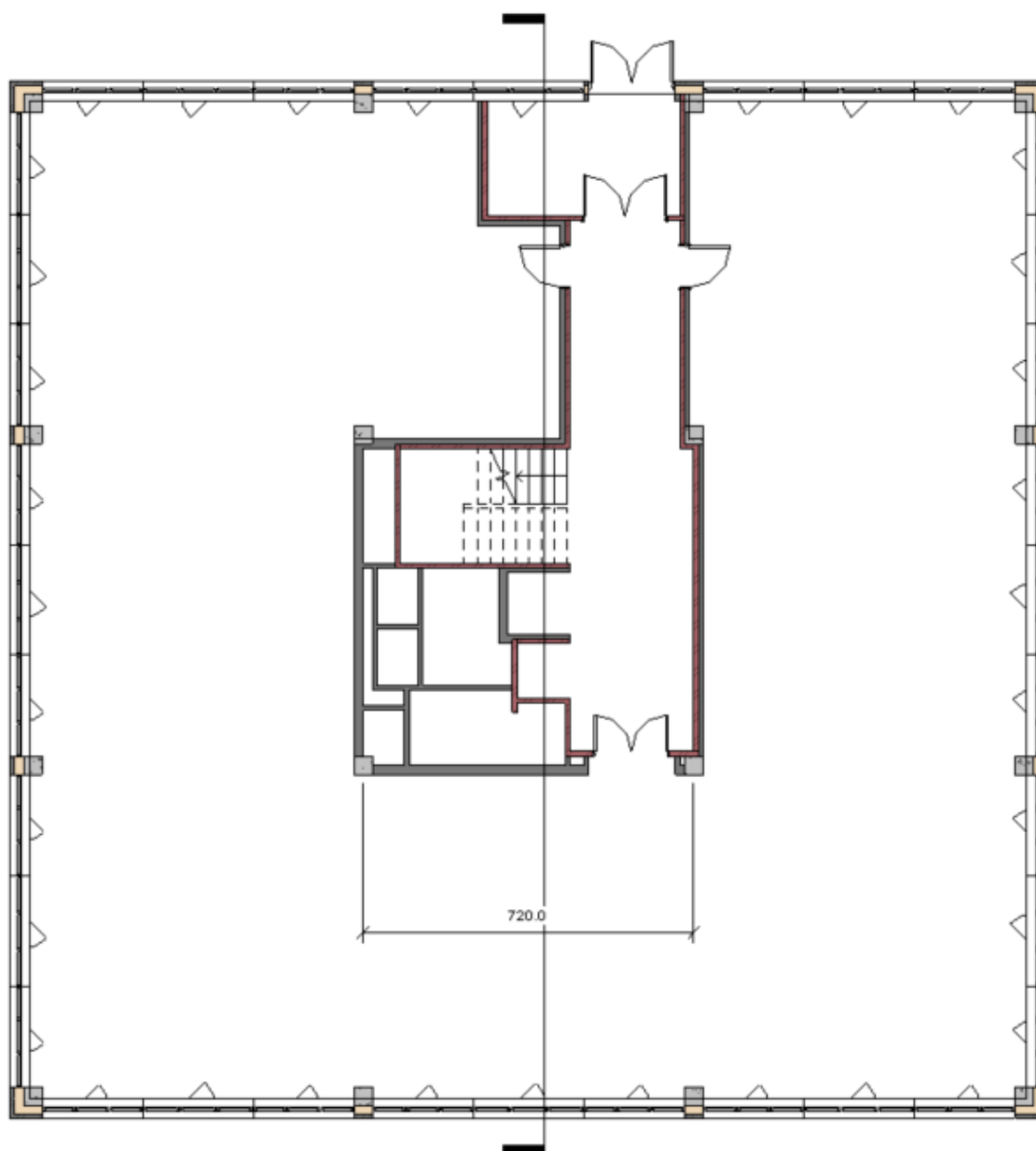
## ii. R0 – Rénovation minimaliste

Rez-de-chaussée



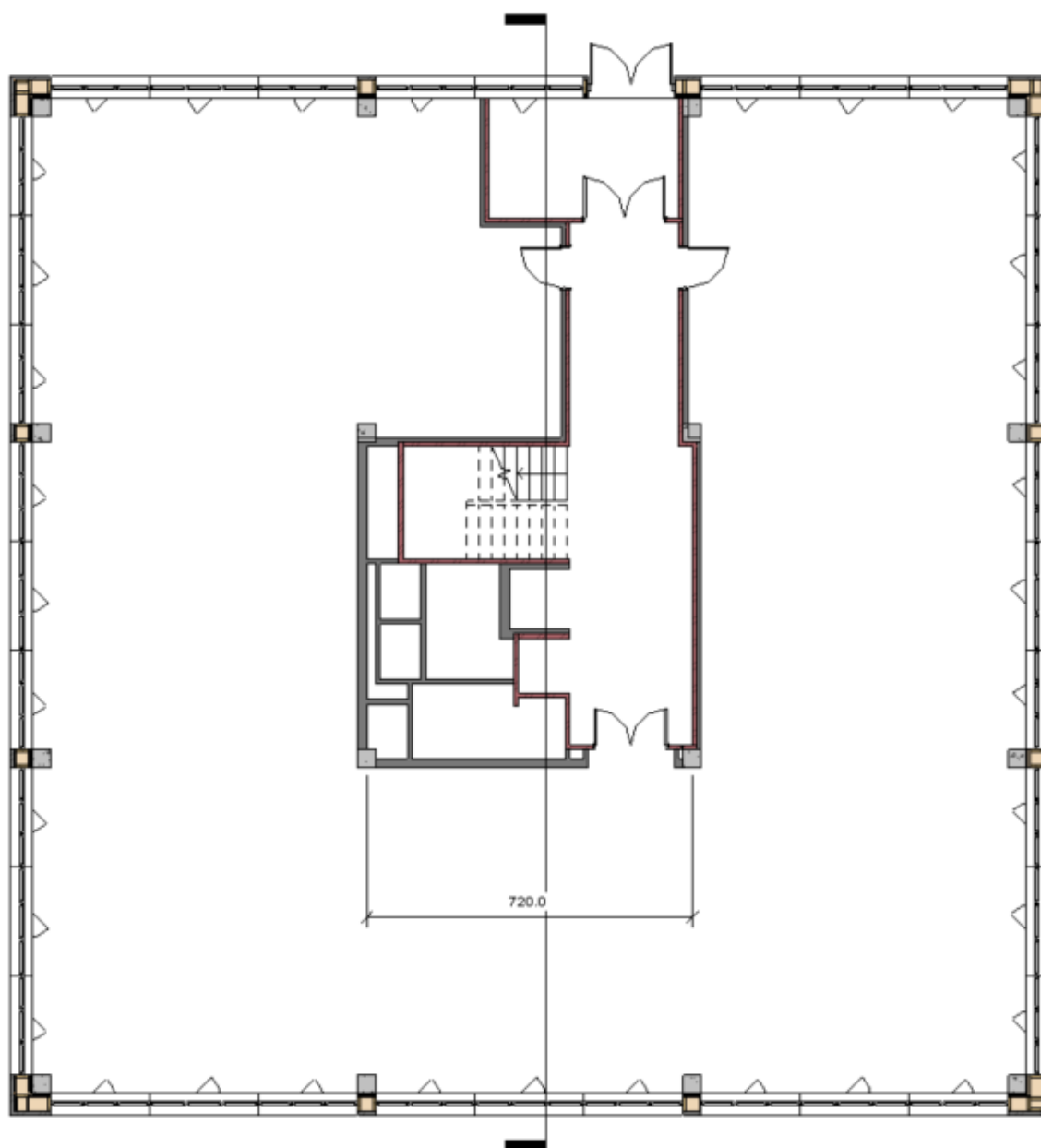
### iii. R1 – Rénovation traditionnelle passive

Rez-de-chaussée



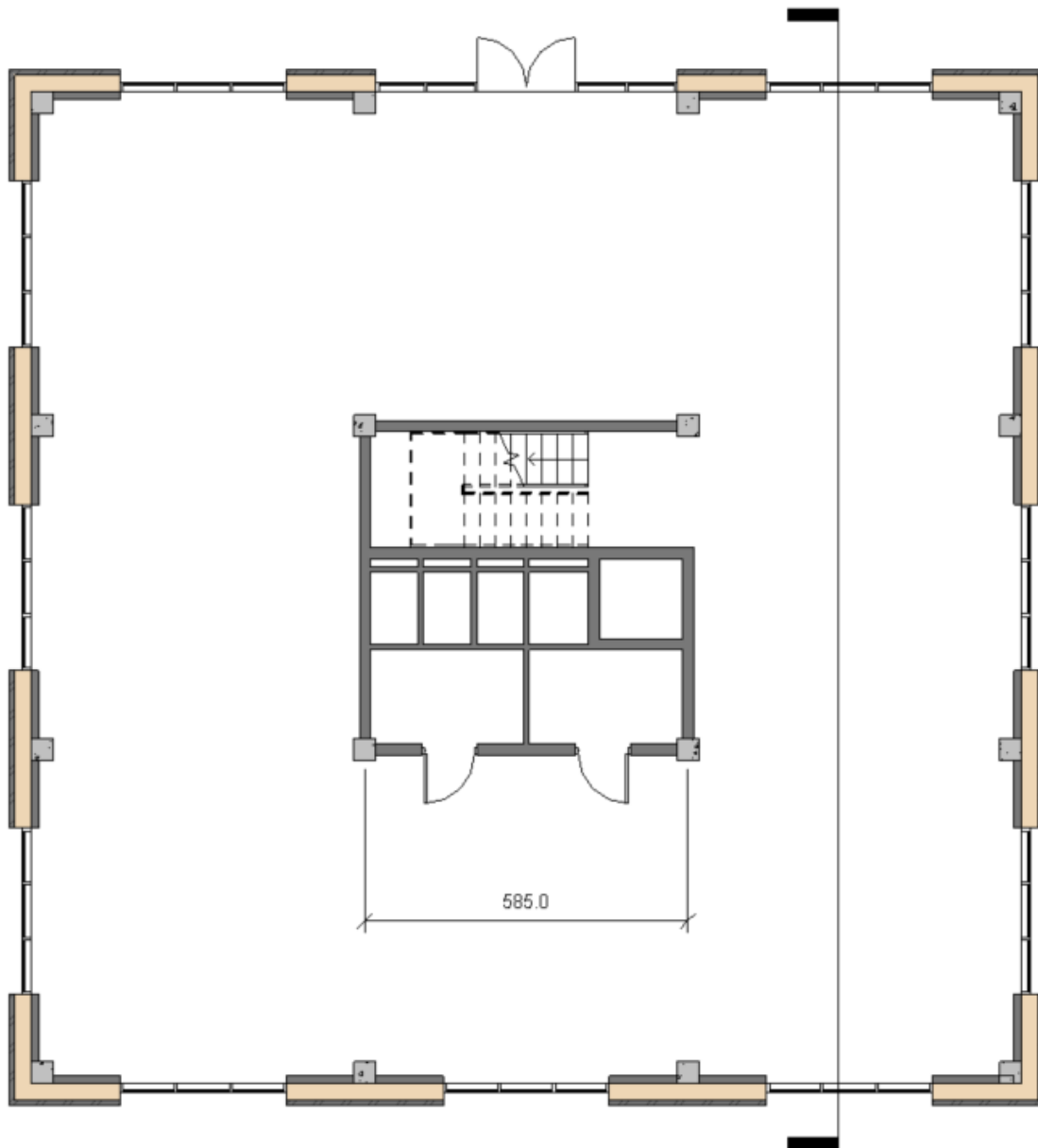
#### iv. R2 – Rénovation ossature bois passive

Rez-de-chaussée



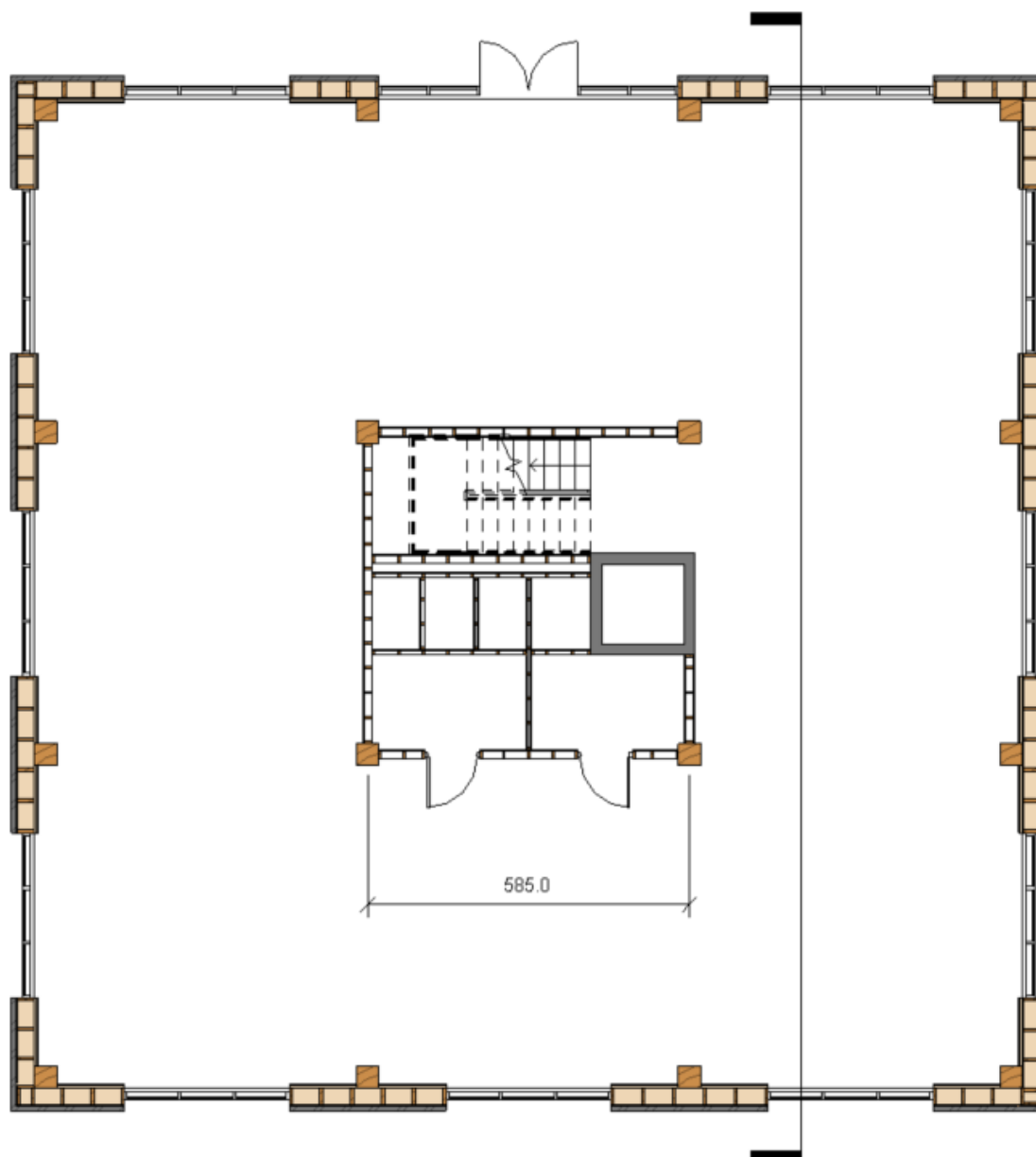
## v. NC1 – Reconstruction traditionnelle passive plus

Rez-de-chaussée



## vi. NC2 – Reconstruction ossature bois passive plus

Rez-de-chaussée



## V. DONNÉES SUR 50 ANS ACV, ACCV)

(MODÉLISATION,

### i. EX – Bâtiment existant

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

			C1-C4	A1-A4	B1-B5	C1-C4
		existant	D initiale	Rénov.	Rempl	D Finale
<b>BETON - BRIQUE</b>						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0			0	0
	* poutres	48,96			0	48,96
	* poteaux porteurs	18,18			0	18,18
	* sols	194,02			0	194,02
	* fondations	25,6			0	25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39			0	83,39
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66			0	2,66
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38			0	197,38
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45			0	42,45
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55			0	21,55
m <sup>3</sup>	Brique grise	0			0	0
m <sup>3</sup>	Crépi	0			0	0
		0			0	0
<b>OSSATURE BOIS</b>						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0			0	0
m <sup>3</sup>	OSB	0			0	0
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0			0	0
		0			0	0
<b>DIVERS</b>						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96			1,92	0,96
		0			0	0
<b>ISOLATION</b>						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0			0	0
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12			0	48,12
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0			0	0
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0			0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0			0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0			0	0
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0			0	0
		0			0	0
<b>MENUISERIES</b>						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22			0	253,22
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0			0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0			0	0
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23			13,23	13,23
<b>ENERGIE (PHPP) - B6</b>						
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	194,90	188663,20	9433160,00		
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	7,21	6980,25	349012,40		
kWh/(m2a)	ECS	16,12	15600,00	780000,00		
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,38	4236,00	211800,00		



Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – bâtiment existant

<b>EX</b>	<b>Global warming (kg CO2)</b>				
	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0	0	0	0	11775,29
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	0	0	4498,66	0	4038,95
<i>MENUISERIES</i>	0	0	176,19	0	330,35
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	3339730,98	0

<b>EX</b>	<b>Acidification (kg SO2)</b>				
	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0	0	0	0	40,90
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	0	0	9,80	0	1,11
<i>MENUISERIES</i>	0	0	3,28	0	0,26
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	7919,41	0

<b>EX</b>	<b>Eutrophication (kg PO4)</b>				
	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0	0	0	0	9,65
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	0	0	0,98	0	0,10
<i>MENUISERIES</i>	0	0	1,04	0	0,06
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	694,60	0

<b>EX</b>	<b>Use of primary energy (MJ)</b>				
	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0	0	0	0	286103
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	0	0	87997,40	0	2653,08
<i>MENUISERIES</i>	0	0	20207,60	0	534,22
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	51812014,15	0

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – bâtiment existant

<b>EX</b>	<b>Cost (€)</b>			
	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0,00	0,00	0,00	125099,28
<i>OSSATURE BOIS</i>	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>ISOLATION ETC.</i>	0,00	2640,94	0,00	3866,89
<i>MENUISERIES</i>	0,00	3321,99	0,00	7713,73
<i>ENERGIE</i>	0,00	0,00	788374,97	0,00

## ii. RO – Rénovation minimaliste

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

			C1-C4	A1-A4	B1-B5	C1-C4
		existant	D initiale	Rénov.	Rempl	D Finale
<b>BETON - BRIQUE</b>						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0	0	0	0	0
	* poutres	48,96				48,96
	* poteaux porteurs	18,18				18,18
	* sols	194,02				194,02
	* fondations	25,6				25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39	11,99	0	0	71,4
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66	0	0	0	2,66
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38	0	0	0	197,38
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45	0	0	0	42,45
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55	0	0	0	21,55
m <sup>3</sup>	Brique grise	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Crépi	0	0	11,25	22,5	11,25
		0	0	0	0	0
<b>OSSATURE BOIS</b>						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	OSB	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>DIVERS</b>						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96	0	0,92	1,84	1,88
		0	0	0	0	0
<b>ISOLATION</b>						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0	0	45,02	0	45,02
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12	0	0	0	48,12
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0	0	45,74	0	45,74
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>MENUISERIES</b>						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22	253,22	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0	0	253,22	0	253,22
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23	0	0	13,23	13,23
<b>ENERGIE (PHPP) - B6</b>						
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	34,68	33573,14	1678657,20		
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	7,61	7363,58	368178,80		
kWh/(m2a)	ECS	16,12	15600,00	780000,00		
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,38	4236,00	211800,00		

Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – rénovation minimaliste

**R0** **Global warming (kg CO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	3721,29	73,45	7442,58	0	11822,88
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	15140,13	43,66	4311,21	0	4126,85
<i>MENUISERIES</i>	16135,75	111,31	176,19	0	351,23
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	909355,65	0

**R0** **Acidification (kg SO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	2,06	0,34	4,12	0	41,27
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	67,47	0,20	9,81	0	1,66
<i>MENUISERIES</i>	78,87	0,51	3,28	0	0,42
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	2193,44	0

**R0** **Eutrophication (kg PO4)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	0,95	0,07	1,90	0	9,73
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	7,70	0,04	0,94	0	0,19
<i>MENUISERIES</i>	8,99	0,11	1,04	0	0,09
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	224,02	0

**R0** **Use of primary energy (MJ)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	42303,37	2090,77	84606,74	0	287095,63
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	224640,53	1242,73	84330,88	0	3986,43
<i>MENUISERIES</i>	281123,72	3168,56	20207,57	0	969,53
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	16979017,09	0

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – rénovation minimaliste

**R0** **Cost (€)**

	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	33988,50	77400	0	129810,78
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	19536,05	2530,90	0	11090,13
<i>MENUISERIES</i>	90766,20	3321,99	0	15044,45
<i>ENERGIE</i>	0	0	307172,47	0

### iii. R1 – Rénovation traditionnelle passive

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

			C1-C4	A1-A4	B1-B5	C1-C4
		existant	D initiale	Rénov.	Rempl	D Finale
<b>BETON - BRIQUE</b>						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0	0	0	0	0
	* poutres	48,96	0	0	0	48,96
	* poteaux porteurs	18,18	0	0	0	18,18
	* sols	194,02	0	0	0	194,02
	* fondations	25,6	0	0	0	25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39	75,02	0	0	8,37
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66	0	0	0	2,66
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38	0	0	0	197,38
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45	0	62,49	0	104,94
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55	0	0	0	21,55
m <sup>3</sup>	Brique grise	0	0	40,17	0	40,17
m <sup>3</sup>	Crépi	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>OSSATURE BOIS</b>						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	OSB	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>DIVERS</b>						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96	0	0,92	1,84	1,88
		0	0	0	0	0
<b>ISOLATION</b>						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0	0	89,26	0	89,26
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12	0	0	0	48,12
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0	0	91,47	0	91,47
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0	0	24,2	0	24,2
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>MENUISERIES</b>						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22	253,22	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0	0	253,22	0	253,22
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23	0	0	13,23	13,23
<b>ENERGIE (PHPP) - B6</b>						
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	10,90	10552,17	527608,40		
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	4,25	4109,16	205458,00		
kWh/(m2a)	ECS	16,12	15600,00	780000,00		
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,20	4063,00	203150,00		

Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – rénovation traditionnelle passive

**R1**

**Global warming (kg CO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	9304,67	275,14	0	0	9998,76
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	32677,58	87,36	4311,22	0	4259,21
<i>MENUISERIES</i>	16135,75	111,31	176,19	0	351,23
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	507346,10	0

**R1**

**Acidification (kg SO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	49,77	1,27	0	0	36,18
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	157,66	0,39	9,81	0	2,49
<i>MENUISERIES</i>	78,87	0,51	3,28	0	0,42
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	1231,14	0

**R1**

**Eutrophication (kg PO4)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	3,03	0,27	0	0	8,47
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	18,22	0,09	0,94	0	0,30
<i>MENUISERIES</i>	8,99	0,11	1,04	0	0,09
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	131,92	0

**R1**

**Use of primary energy (MJ)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	220146,25	7831,98	0	0	241786,49
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	465550,90	2486,79	84330,88	0	5982,95
<i>MENUISERIES</i>	281123,72	3168,56	20207,57	0	969,53
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	10044309,78	0

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – rénovation traditionnelle passive

**R1**

**Cost (€)**

	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	74676,18	0	0	156651,20
<i>OSSATURE BOIS</i>	0	0	0	0
<i>ISOLATION ETC.</i>	42259,44	2530,90	0	20085,30
<i>MENUISERIES</i>	114676,88	3321,99	0	15044,45
<i>ENERGIE</i>	0	0	189786,48	0

## iv. R2 – Rénovation ossature bois passive

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

			C1-C4	A1-A4	B1-B5	C1-C4
		existant	D initiale	Rénov.	Rempl	D Finale
<b>BETON - BRIQUE</b>						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0	0	0	0	0
	* poutres	48,96	0	0	0	48,96
	* poteaux porteurs	18,18	0	0	0	18,18
	* sols	194,02	0	0	0	194,02
	* fondations	25,6	0	0	0	25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39	75,02	0	0	8,37
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66	0	0	0	2,66
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38	0	0	0	197,38
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45	0	0	0	42,45
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55	0	0	0	21,55
m <sup>3</sup>	Brique grise	0	0	40,33	0	40,33
m <sup>3</sup>	Crépi	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>OSSATURE BOIS</b>						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0	0	21,67	0	21,67
m <sup>3</sup>	OSB	0	0	24,2	0	24,2
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>DIVERS</b>						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96	0	0,92	1,84	1,88
		0	0	0	0	0
<b>ISOLATION</b>						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12	0	0	0	48,12
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0	0	91,47	0	91,47
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0	0	24,2	0	24,2
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0	0	155,9	0	155,9
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>MENUISERIES</b>						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22	253,22	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0	0	253,22	0	253,22
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23	0	0	13,23	13,23
<b>ENERGIE (PHPP) - B6</b>						
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	10,03	9705,17	485258,40		
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	4,29	4155,62	207781,20		
kWh/(m2a)	ECS	16,12	15600,00	780000,00		
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,19	4055,00	202750,00		

Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – rénovation ossature bois passive

**R2**

**Global warming (kg CO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	6448,88	143,05	0	0	9949,13
<i>OSSATURE BOIS</i>	3924,70	276,48	0	0	1342,56
<i>ISOLATION ETC.</i>	54102,52	92	4311,22	0	4539,01
<i>MENUISERIES</i>	16135,75	111,31	176,19	0	351,23
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	494444,55	0

**R2**

**Acidification (kg SO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	42,21	0,66	0	0	35,80
<i>OSSATURE BOIS</i>	17,72	1,27	0	0	2,08
<i>ISOLATION ETC.</i>	316,82	0,41	9,81	0	4,20
<i>MENUISERIES</i>	78,87	0,51	3,28	0	0,42
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	1200,87	0

**R2**

**Eutrophication (kg PO4)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	1,79	0,14	0	0	8,38
<i>OSSATURE BOIS</i>	3,86	1,09	0	0	0,45
<i>ISOLATION ETC.</i>	37,69	0,10	0,94	0	0,55
<i>MENUISERIES</i>	8,99	0,11	1,04	0	0,09
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	129,56	0

**R2**

**Use of primary energy (MJ)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	178590,40	4072,06	0	0	240751,45
<i>OSSATURE BOIS</i>	248830,43	7870,27	0	0	5526,87
<i>ISOLATION ETC.</i>	711970,36	2618,79	84330,88	0	10114,57
<i>MENUISERIES</i>	281123,72	3168,56	20207,57	0	969,53
<i>ENERGIE</i>	0	0	0	9869961,60	0

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – rénovation ossature bois passive

**R2**

**Cost (€)**

	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	53594,09	0	0	136826,84
<i>OSSATURE BOIS</i>	82766,64	0	0	4905,22
<i>ISOLATION ETC.</i>	55239,24	2530,90	0	25335,70
<i>MENUISERIES</i>	114676,89	3321,99	0	15044,45
<i>ENERGIE</i>	0	0	187638,20	0

## v. NC1 – Reconstruction traditionnelle passive plus

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

BETON - BRIQUE						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0	0	0	0	0
	* poutres	48,96	48,96	29,43	0	29,43
	* poteaux porteurs	18,18	18,18	23,3	0	23,3
	* sols	194,02	194,02	130,94	0	130,94
	* fondations	25,6	25,6	25,6	0	25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39	83,39	0	0	0
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66	2,66	3,5	0	3,5
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38	197,38	123,5	0	123,5
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45	42,45	106,71	0	106,71
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55	21,55	0	0	0
m <sup>3</sup>	Brique grise	0	0	36,09	0	36,09
m <sup>3</sup>	Crépi	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
OSSATURE BOIS						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0	0	0	0	0
	*escalier bois	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	OSB	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Lamellé-collé	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0	0	48,75	0	48,75
		0	0	0	0	0
DIVERS						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96	0,96	0,64	1,28	0,64
		0	0	0	0	0
ISOLATION						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0	0	111,87	0	111,87
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12	48,12	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0	0	128,88	0	128,88
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0	0	64,44	0	64,44
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
MENUISERIES						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22	253,22	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0	0	276,84	0	276,84
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23	13,23	11,34	11,34	11,34
ENERGIE (PHPP) - B6						
m <sup>2</sup>	Panneaux photovoltaïques			36	36	36
m <sup>2</sup>	Panneaux solaires thermiques			54	54	54
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		Ap. Solaire
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	3,10	2997,43	149871,33	th	2997,43
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	0,27	260,98	13049,10	pv	260,98
kWh/(m2a)	ECS	16,14	15600,00	780000,00	th	15600,00
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,21	4065,00	203250,00	pv	4065,00



Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – reconstruction traditionnelle passive plus

**NC1**

**Global warming (kg CO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	69191,51	4949,10	0	0	19719,35
<i>OSSATURE BOIS</i>	44,74	4,31	0	0	4,63
<i>ISOLATION ETC.</i>	39929,96	105,65	2999,10	0	4304,06
<i>MENUISERIES</i>	41861,18	303,69	147,43	0	606,02
<i>ENERGIE</i>	12688,62	79,85	12688,62	0	31,35

**NC1**

**Acidification (kg SO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	147,89	9,26	0	0	68,44
<i>OSSATURE BOIS</i>	0,92	0,02	0	0	0,11
<i>ISOLATION ETC.</i>	187,19	0,50	6,53	0	2,79
<i>MENUISERIES</i>	199,43	1,40	2,74	0	0,44
<i>ENERGIE</i>	80,89	0,33	80,89	0	0,17

**NC1**

**Eutrophication (kg PO4)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	22,18	1,93	0	0	16,16
<i>OSSATURE BOIS</i>	0,35	0	0	0	0,15
<i>ISOLATION ETC.</i>	19,51	0,05	0,65	0	0,35
<i>MENUISERIES</i>	26,06	0,30	0,87	0	0,09
<i>ENERGIE</i>	29,94	0,07	29,94	0	0,06

**NC1**

**Use of primary energy (MJ)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	734249,91	83907,63	0	0	479155,50
<i>OSSATURE BOIS</i>	2119,52	122,75	0	0	53,52
<i>ISOLATION ETC.</i>	434493,21	1434,53	58664,96	0	6717,32
<i>MENUISERIES</i>	17108,05	8644,67	16908,32	0	867,23
<i>ENERGIE</i>	142704,66	2228,71	142704,66	0	513,34

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – reconstruction traditionnelle passive plus

**NC1**

**Cost (€)**

	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	305924,69	0	0	230569,32
<i>OSSATURE BOIS</i>	7919,19	0	0	5213,20
<i>ISOLATION ETC.</i>	65450,66	1760,62	0	27962,47
<i>MENUISERIES</i>	127892,90	2847,42	0	16056,54
<i>ENERGIE</i>	37800	41649,75	0	3849,75

## vi. NC2 – Reconstruction ossature bois passive plus

Tableau global des quantités de matériaux utilisés dans chaque phase.

			C1-C4	A1-A4	B1-B5	C1-C4
		existant	D initiale	Rénov.	Rempl	D Finale
<b>BETON - BRIQUE</b>						
m <sup>3</sup>	Béton coulé	0	0	0	0	0
	* poutres	48,96	48,96	0	0	0
	* poteaux porteurs	18,18	18,18	0	0	0
	* sols	194,02	194,02	108,39	0	108,39
	* fondations	25,6	25,6	25,6	0	25,6
m <sup>3</sup>	Béton préfab	83,39	83,39	0	0	0
m <sup>3</sup>	Béton escalier	2,66	2,66	0	0	0
m <sup>3</sup>	Hourdis	197,38	197,38	0	0	0
m <sup>3</sup>	Blocs béton	42,45	42,45	12,06	0	12,06
m <sup>3</sup>	Brique rouge	21,55	21,55	0	0	0
m <sup>3</sup>	Brique grise	0	0	36,38	0	36,38
m <sup>3</sup>	Crépi	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>OSSATURE BOIS</b>						
m <sup>3</sup>	Pin rouge	0	0	65,71	0	65,71
	*escalier bois	0	0	0,73	0	0,73
m <sup>3</sup>	OSB	0	0	58,63	0	58,63
m <sup>3</sup>	Lamellé-collé (poutres)	0	0	23,99	0	23,99
m <sup>2</sup>	Bardage bois	0	0	48,75	0	48,75
		0	0	0	0	0
<b>DIVERS</b>						
m <sup>3</sup>	Roofing, EPDM	0,96	0,96	0,64	1,28	0,64
		0	0	0	0	0
<b>ISOLATION</b>						
m <sup>3</sup>	Isolation, murs exts	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Isolation rigide, toiture (existante)	48,12	48,12	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche rigide, toiture	0	0	128,88	0	128,88
m <sup>3</sup>	Jetspray, sol	0	0	64,44	0	64,44
m <sup>3</sup>	Laine de roche (acoustique)	0	0	0	0	0
m <sup>3</sup>	Laine de roche, oss bois	0	0	138,19	0	138,19
m <sup>3</sup>	Neopor, coffrages isolants	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0
<b>MENUISERIES</b>						
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres SV	253,22	253,22	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres DV	0	0	0	0	0
m <sup>2</sup>	Portes et Fenêtres TV	0	0	276,84	0	276,84
m <sup>2</sup>	Menuiseries intérieures	13,23	13,23	11,34	11,34	11,34
<b>ENERGIE (PHPP) - B6</b>						
m <sup>2</sup>	Panneaux photovoltaïques			36	36	36
m <sup>2</sup>	Panneaux solaires thermiques			54	54	54
		kWh/m2a	kWh/a	kWh		Ap. Solaire
kWh/(m2a)	Besoin de chaleur de chauffage	3,21	3103,75	155187,63	th	3103,75
kWh/(m2a)	Demande totale de refroidissement	0,27	261,95	13097,43	pv	261,95
kWh/(m2a)	ECS	16,14	15600,00	780000,00	th	15600,00
kWh/(m2a)	Electricité auxiliaire	4,23	4089,00	204450,00	pv	4089,00

Tableaux des résultats d'analyse de cycle de vie – reconstruction ossature bois passive plus

**NC2**

**Global warming (kg CO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	32371,60	2623,41	0	0	12869
<i>OSSATURE BOIS</i>	15892	835,71	0	0	4467,82
<i>ISOLATION ETC.</i>	55830,50	93,58	2999,10	0	4549,31
<i>MENUISERIES</i>	41861,20	303,69	147,43	0	606,02
<i>ENERGIE</i>	12014,10	71,77	12014,10	0	31,13

**NC2**

**Acidification (kg SO2)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	86,79	4,33	0	0	53,6606
<i>OSSATURE BOIS</i>	66,20	3,84	0	0	15,37
<i>ISOLATION ETC.</i>	337,22	0,61	6,53	0	4,28
<i>MENUISERIES</i>	199,43	1,40	2,74	0	0,44
<i>ENERGIE</i>	76,17	0,29	76,17	0	0,17

**NC2**

**Eutrophication (kg PO4)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	8,20	0,90	0	0	12,6669
<i>OSSATURE BOIS</i>	19,40	0,84	0	0	12,13
<i>ISOLATION ETC.</i>	44,68	0,09	0,65	0	0,56
<i>MENUISERIES</i>	26,06	0,30	0,87	0	0,09
<i>ENERGIE</i>	28,83	0,06	28,83	0	0,06

**NC2**

**Use of primary energy (MJ)**

	A1-A3	A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	335297	42009,50	0	0	373330
<i>OSSATURE BOIS</i>	691296	23788,50	0	0	23454,30
<i>ISOLATION ETC.</i>	434147	2663,65	58665	0	10322,50
<i>MENUISERIES</i>	17108,10	8644,67	16908,30	0	867,23
<i>ENERGIE</i>	141259	2003,35	141259	0	510,06

Tableau des résultats de l'analyse des coûts de cycle de vie – reconstruction ossature bois passive plus

**NC2**

**Cost (€)**

	A1-A4	B1-B5	B6	C1-C4
<i>BETON - BRIQUE</i>	124169	0	0	170671
<i>OSSATURE BOIS</i>	268518	0	0	21153,30
<i>ISOLATION ETC.</i>	70827,70	1760,62	0	30036,20
<i>MENUISERIES</i>	127893	2847,42	0	16056,50
<i>ENERGIE</i>	37800	41649,80	0	3849,75

## VI. DONNÉES ÉVOLUTIVES À LONG TERME

### i. Sur 50 ans

Coûts	années	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
EX	conso		78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5
	roofing					1320,468				1320,468		
	menuiseries									3321,987		
	démolition											136679,9
<b>EX</b>		<b>0</b>	<b>78837,5</b>	<b>157675</b>	<b>236512,5</b>	<b>316670,5</b>	<b>395508</b>	<b>474345,4</b>	<b>553182,9</b>	<b>636662,9</b>	<b>715500,4</b>	<b>931017,8</b>
R0	conso		30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25
	crépi					38700				38700		
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		10324,8									145620,6
	rénovation		144290,8									
<b>R0</b>		<b>0</b>	<b>185332,8</b>	<b>216050</b>	<b>246767,3</b>	<b>317450</b>	<b>348167,2</b>	<b>378884,5</b>	<b>409601,7</b>	<b>483606,4</b>	<b>514323,7</b>	<b>690661,5</b>
R1	conso		18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									165716,6
	rénovation		231612,5									
<b>R1</b>		<b>0</b>	<b>276655,5</b>	<b>295634,1</b>	<b>314612,8</b>	<b>334856,9</b>	<b>353835,5</b>	<b>372814,2</b>	<b>391792,8</b>	<b>415358,9</b>	<b>434337,6</b>	<b>619032,8</b>
R2	conso		18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									156047,9
	rénovation		306276,8									
<b>R2</b>		<b>0</b>	<b>351105</b>	<b>369868,8</b>	<b>388632,6</b>	<b>408661,9</b>	<b>427425,7</b>	<b>446189,6</b>	<b>464953,4</b>	<b>488304,6</b>	<b>507068,4</b>	<b>681880,1</b>
NC1	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					
	PS therm						26609,85					
	démolition		136679,9									146971,4
	rénovation		544987,4									
<b>NC1</b>		<b>0</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>682547,7</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>727925,1</b>	<b>727925,1</b>	<b>874896,5</b>
NC2	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					
	PS therm						26609,85					
	démolition		136679,9									105087
	rénovation		629206,7									
<b>NC2</b>		<b>0</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>766766,9</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>812144,4</b>	<b>812144,4</b>	<b>917231,4</b>

## i. Sur 100 ans

Coûts	années	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
EX	conso		78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5
	roofing					1320,468				1320,468		
	menuiseries									3321,987		
	démolition											
<b>EX</b>		<b>0</b>	<b>78837,5</b>	<b>157675</b>	<b>236512,5</b>	<b>316670,5</b>	<b>395508</b>	<b>474345,4</b>	<b>553182,9</b>	<b>636662,9</b>	<b>715500,4</b>	<b>794337,9</b>
R0	conso		30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25
	crépi					38700				38700		
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		10324,8									
	rénovation		144290,8									
<b>R0</b>		<b>0</b>	<b>185332,8</b>	<b>216050</b>	<b>246767,3</b>	<b>317450</b>	<b>348167,2</b>	<b>378884,5</b>	<b>409601,7</b>	<b>483606,4</b>	<b>514323,7</b>	<b>545040,9</b>
R1	conso		18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									
	rénovation		231612,5									
<b>R1</b>		<b>0</b>	<b>276655,5</b>	<b>295634,1</b>	<b>314612,8</b>	<b>334856,9</b>	<b>353835,5</b>	<b>372814,2</b>	<b>391792,8</b>	<b>415358,9</b>	<b>434337,6</b>	<b>453316,2</b>
R2	conso		18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									
	rénovation		306276,8									
<b>R2</b>		<b>0</b>	<b>351105</b>	<b>369868,8</b>	<b>388632,6</b>	<b>408661,9</b>	<b>427425,7</b>	<b>446189,6</b>	<b>464953,4</b>	<b>488304,6</b>	<b>507068,4</b>	<b>525832,3</b>
NC1	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					15039,9
	PS therm						26609,85					26609,85
	démolition		136679,9									
	rénovation		544987,4									
<b>NC1</b>		<b>0</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>682547,7</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>727925,1</b>	<b>727925,1</b>	<b>769574,9</b>
NC2	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					15039,9
	PS therm						26609,85					26609,85
	démolition		136679,9									
	rénovation		629206,7									
<b>NC2</b>		<b>0</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>766766,9</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>812144,4</b>	<b>812144,4</b>	<b>853794,1</b>

50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5
		1320,468				1320,468				
						3321,987				
										136679,9
<b>794337,9</b>	<b>873175,4</b>	<b>953333,4</b>	<b>1032171</b>	<b>1111008</b>	<b>1189846</b>	<b>1273326</b>	<b>1352163</b>	<b>1431001</b>	<b>1509838</b>	<b>1725356</b>
30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25
		38700				38700				
		1265,449				1265,449				
						3321,987				
										145620,6
<b>545040,9</b>	<b>575758,2</b>	<b>646440,9</b>	<b>677158,1</b>	<b>707875,3</b>	<b>738592,6</b>	<b>812597,3</b>	<b>843314,5</b>	<b>874031,8</b>	<b>904749</b>	<b>1081087</b>
18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65
		1265,449				1265,449				
						3321,987				
										165716,6
<b>453316,2</b>	<b>472294,9</b>	<b>492539</b>	<b>511517,6</b>	<b>530496,2</b>	<b>549474,9</b>	<b>573041</b>	<b>592019,6</b>	<b>610998,3</b>	<b>629976,9</b>	<b>814672,2</b>
18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82
		1265,449				1265,449				
						3321,987				
										156047,9
<b>525832,3</b>	<b>544596,1</b>	<b>564625,4</b>	<b>583389,2</b>	<b>602153</b>	<b>620916,8</b>	<b>644268,1</b>	<b>663031,9</b>	<b>681795,7</b>	<b>700559,5</b>	<b>875371,2</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		880,312				880,312				
						2847,417				
15039,9					15039,9					
26609,85					26609,85					
										146971,4
<b>769574,9</b>	<b>769574,9</b>	<b>770455,2</b>	<b>770455,2</b>	<b>770455,2</b>	<b>812104,9</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>962804,1</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		880,312				880,312				
						2847,417				
15039,9					15039,9					
26609,85					26609,85					
										105087
<b>853794,1</b>	<b>853794,1</b>	<b>854674,4</b>	<b>854674,4</b>	<b>854674,4</b>	<b>896324,2</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>1005139</b>

## i. Sur 150 ans

Coûts	années	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
EX	conso		78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5
	roofing					1320,468				1320,468		
	menuiseries									3321,987		
	démolition											
<b>EX</b>		<b>0</b>	<b>78837,5</b>	<b>157675</b>	<b>236512,5</b>	<b>316670,5</b>	<b>395508</b>	<b>474345,4</b>	<b>553182,9</b>	<b>636662,9</b>	<b>715500,4</b>	<b>794337,9</b>
R0	conso		30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25
	crépi					38700				38700		
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		10324,8									
	rénovation		144290,8									
<b>R0</b>		<b>0</b>	<b>185332,8</b>	<b>216050</b>	<b>246767,3</b>	<b>317450</b>	<b>348167,2</b>	<b>378884,5</b>	<b>409601,7</b>	<b>483606,4</b>	<b>514323,7</b>	<b>545040,9</b>
R1	conso		18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									
	rénovation		231612,5									
<b>R1</b>		<b>0</b>	<b>276655,5</b>	<b>295634,1</b>	<b>314612,8</b>	<b>334856,9</b>	<b>353835,5</b>	<b>372814,2</b>	<b>391792,8</b>	<b>415358,9</b>	<b>434337,6</b>	<b>453316,2</b>
R2	conso		18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82
	roofing					1265,449				1265,449		
	menuiseries									3321,987		
	démolition		26064,34									
	rénovation		306276,8									
<b>R2</b>		<b>0</b>	<b>351105</b>	<b>369868,8</b>	<b>388632,6</b>	<b>408661,9</b>	<b>427425,7</b>	<b>446189,6</b>	<b>464953,4</b>	<b>488304,6</b>	<b>507068,4</b>	<b>525832,3</b>
NC1	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					15039,9
	PS therm						26609,85					26609,85
	démolition		136679,9									
	rénovation		544987,4									
<b>NC1</b>		<b>0</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>681667,3</b>	<b>682547,7</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>724197,4</b>	<b>727925,1</b>	<b>727925,1</b>	<b>769574,9</b>
NC2	conso		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	roofing					880,312				880,312		
	menuiseries									2847,417		
	PS photov.						15039,9					15039,9
	PS therm						26609,85					26609,85
	démolition		136679,9									
	rénovation		629206,7									
<b>NC2</b>		<b>0</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>765886,6</b>	<b>766766,9</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>808416,6</b>	<b>812144,4</b>	<b>812144,4</b>	<b>853794,1</b>

50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
78837,5	78837,5	78837,5 1320,468	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5 1320,468 3321,987	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5 1320,468
<b>794337,9</b>	<b>873175,4</b>	<b>953333,4</b>	<b>1032171</b>	<b>1111008</b>	<b>1189846</b>	<b>1273326</b>	<b>1352163</b>	<b>1431001</b>	<b>1509838</b>	<b>1589996</b>
30717,25	30717,25	30717,25 38700 1265,449	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25 38700 1265,449 3321,987	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25 38700 1265,449
<b>545040,9</b>	<b>575758,2</b>	<b>646440,9</b>	<b>677158,1</b>	<b>707875,3</b>	<b>738592,6</b>	<b>812597,3</b>	<b>843314,5</b>	<b>874031,8</b>	<b>904749</b>	<b>975431,7</b>
18978,65	18978,65	18978,65 1265,449	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65 1265,449 3321,987	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65 1265,449
<b>453316,2</b>	<b>472294,9</b>	<b>492539</b>	<b>511517,6</b>	<b>530496,2</b>	<b>549474,9</b>	<b>573041</b>	<b>592019,6</b>	<b>610998,3</b>	<b>629976,9</b>	<b>650221</b>
18763,82	18763,82	18763,82 1265,449	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82 1265,449 3321,987	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82 1265,449
<b>525832,3</b>	<b>544596,1</b>	<b>564625,4</b>	<b>583389,2</b>	<b>602153</b>	<b>620916,8</b>	<b>644268,1</b>	<b>663031,9</b>	<b>681795,7</b>	<b>700559,5</b>	<b>720588,8</b>
0	0	0 880,312	0	0	0	0 880,312 2847,417	0	0	0	0 880,312
15039,9 26609,85					15039,9 26609,85					15039,9 26609,85
<b>769574,9</b>	<b>769574,9</b>	<b>770455,2</b>	<b>770455,2</b>	<b>770455,2</b>	<b>812104,9</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>815832,7</b>	<b>858362,7</b>
0	0	0 880,312	0	0	0	0 880,312 2847,417	0	0	0	0 880,312
15039,9 26609,85					15039,9 26609,85					15039,9 26609,85
<b>853794,1</b>	<b>853794,1</b>	<b>854674,4</b>	<b>854674,4</b>	<b>854674,4</b>	<b>896324,2</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>900051,9</b>	<b>942582</b>



100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
78837,5 1320,468	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5 1320,468 3321,987	78837,5	78837,5	78837,5	78837,5 1320,468	78837,5	78837,5
										136679,9
<b>1589996</b>	<b>1668834</b>	<b>1747671</b>	<b>1826509</b>	<b>1909989</b>	<b>1988826</b>	<b>2067664</b>	<b>2146501</b>	<b>2226659</b>	<b>2305497</b>	<b>2521014</b>
30717,25 38700 1265,449	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25 38700 1265,449 3321,987	30717,25	30717,25	30717,25	30717,25 38700 1265,449	30717,25	30717,25
										145620,6
<b>975431,7</b>	<b>1006149</b>	<b>1036866</b>	<b>1067583</b>	<b>1141588</b>	<b>1172305</b>	<b>1203023</b>	<b>1233740</b>	<b>1304423</b>	<b>1335140</b>	<b>1511478</b>
18978,65 1265,449	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65 1265,449 3321,987	18978,65	18978,65	18978,65	18978,65 1265,449	18978,65	18978,65
										165716,6
<b>650221</b>	<b>669199,7</b>	<b>688178,3</b>	<b>707157</b>	<b>730723</b>	<b>749701,7</b>	<b>768680,3</b>	<b>787659</b>	<b>807903,1</b>	<b>826881,7</b>	<b>1011577</b>
18763,82 1265,449	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82 1265,449 3321,987	18763,82	18763,82	18763,82	18763,82 1265,449	18763,82	18763,82
										156047,9
<b>720588,8</b>	<b>739352,6</b>	<b>758116,4</b>	<b>776880,3</b>	<b>800231,5</b>	<b>818995,3</b>	<b>837759,2</b>	<b>856523</b>	<b>876552,2</b>	<b>895316,1</b>	<b>1070128</b>
0 880,312	0	0	0	0 880,312 2847,417	0	0	0	0 880,312	0	0
15039,9 26609,85					15039,9 26609,85					146971,4
<b>858362,7</b>	<b>858362,7</b>	<b>858362,7</b>	<b>858362,7</b>	<b>862090,5</b>	<b>903740,2</b>	<b>903740,2</b>	<b>903740,2</b>	<b>904620,5</b>	<b>904620,5</b>	<b>1051592</b>
0 880,312	0	0	0	0 880,312 2847,417	0	0	0	0 880,312	0	0
15039,9 26609,85					15039,9 26609,85					105087
<b>942582</b>	<b>942582</b>	<b>942582</b>	<b>942582</b>	<b>946309,7</b>	<b>987959,5</b>	<b>987959,5</b>	<b>987959,5</b>	<b>988839,8</b>	<b>988839,8</b>	<b>1093927</b>