

Analyse de stratégies en vue de construire des infrastructures sportives intérieures plus durables en Belgique

Auteur : Schyns, Alexandre

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 : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11458>

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 stratégies en vue de construire des infrastructures sportives intérieures plus durables en Belgique

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

Promoteur: Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury:

Prof. REITER Sigrig

Prof. PRÉGARDIEN Michel

A. Abstract

This Master thesis starts with a double acknowledgment: indoor sport facilities have a non negligible impact on the environment and sport associations have tight financial constraints. Indoors facilities are however necessary in Belgium in order to offer a good training environment to athletes when the weather conditions are not favorable for training outside. In this work, the objective is to suggest strategies allowing to build low-cost sustainable indoor sport facilities in Belgium.

In order to derive the best strategies, the athletic indoor facility of Hannut has been selected as case study. Inaugurated in 2021, this sport center is representative of what may be built nowadays in Belgium for that category of buildings. Six scenarios, based on measures assumed to improve sustainability, have been considered. In order for them to be acceptable, they should satisfy two constraints. First, they should not imply an exaggerated increase of overheating. Moreover, they should not lead to a financial investment higher than at most 15% of the initial investment of the case study. The measures used to build the scenarios are, among others, the installation of photovoltaic panels, the use of bio-based insulation materials and a partial burial of the building. These measures have been selected following a bibliographic search and using the recommendations outlined in the European report Step2Sport devoted to the renewal of sports facilities.

The different scenarios and the case study have been modeled in the program DesignBuilder in order to simulate their thermic behavior (using EnergiePlus). Three analyses have then been performed in order to compare their performance on three criteria advocated by Europe: environmental impact, economical impact and users comfort. Therefore, a life cycle analysis (according to EN 15978), a life cycle cost analysis (according to EN 15459) as well as an evaluation of overheating (PEB method) have been undertaken. Both life cycle analyses have been conducted over a 50-year period, without taking into account the end of life costs and modules, but using financial monetization and updating of the results.

The thesis shows that it is possible to reach gains up to -51% of environmental costs and - 6.7% of global costs over a 50-year period with respect to the case study and with an initial investment increased by at most 15%. A decrease of 45% of the overheating indicator is also possible. The best scenario, among those considered here, allows to save simultaneously 28.6% of environmental costs, 5.7% of economical costs and 24% of overheating. This specific scenario consisted in adding a "photovoltaïque installation", a partial burial (one fourth) of the building and a modification of the total area of windows. Moreover, it has been noticed that one of the best options in order to reach environmental or economical gain is to achieve a decrease in the consumption of electricity or to provide a production of electricity by means of photovoltaic panels. Finally, the use of bio-based materials in this type of buildings allows to decrease the environmental impact but is less cost-effective over a 50-year period than the use of synthetic insulation materials.

B. Résumé

Ce mémoire commence par un double constat: les infrastructures sportives intérieures présentent un impact environnemental non négligeable et la plupart des clubs sportifs ont des finances très limitées. Disposer de telles salles en Belgique est nécessaire pour assurer la qualité des entraînements lorsque les conditions climatiques ne permettent pas de les faire en extérieur. Ce travail a dès lors pour but de déterminer comment rendre ces salles plus durables écologiquement sans les rendre davantage inaccessibles en augmentant leur coût excessivement.

Pour ce faire, un cas d'étude a été sélectionné: le hall d'athlétisme de la ville de Hannut. Inauguré en 2021, il est représentatif de ce qui se construit actuellement en Belgique dans le domaine. Six scénarios, constitués d'une série de mesures visant à en diminuer l'impact environnemental, ont ensuite été créés. Pour être considérés acceptables, les scénarios doivent respecter deux critères: ne pas provoquer trop de surchauffe et représenter un investissement représentant maximum 15% du coût du cas d'étude. Les différentes mesures qu'ils utilisent sont, par exemple, l'installation de panneaux photovoltaïques, l'utilisation d'isolants bio-sourcés ou encore l'enterrement partiel du bâtiment. Ces mesures ont été sélectionnées sur base d'une revue de la littérature et à partir des recommandations de l'étude européenne Step2Sport portant sur la rénovation des halls sportifs.

Les différents scénarios et le cas d'étude ont été modélisés dans le programme DesignBuilder afin de simuler leur comportement thermique (à l'aide du moteur EnergiePlus). Trois études ont ensuite été menées dans le but de les comparer sur les trois critères que l'Europe souhaite mettre en avant: l'impact environnemental, l'impact économique et le confort des usagers. Ainsi, une analyse du cycle de vie (selon EN 15978), une analyse du coût du cycle de vie (selon EN 15459) et une évaluation de la quantité de surchauffe (méthode PEB) ont été réalisées. Les études portant sur le cycle de vie (ACV et ACCV) ont été menées sur une période de 50 ans sans comptabilisation des coûts/modules de fin de vie, mais avec monétisation et actualisation des résultats.

Il a été observé qu'avec un investissement initial augmenté de maximum 15%, des gains allant jusqu'à -51% des coûts environnementaux et -6,7% des coûts globaux sont atteignables sur une période de 50 ans par rapport au cas d'étude. Une baisse de 45% de l'indicateur de surchauffe est également possible. Le scénario le plus performant, parmi ceux étudiés, a ainsi permis d'économiser simultanément 28,6% des coûts environnementaux et 5,7% des coûts économiques globaux et de diminuer de 24% la surchauffe. Celui-ci consistait en l'ajout d'une installation photovoltaïque, l'enfouissement d'un quart de la hauteur du bâtiment et la modification des surfaces de vitrage. Il est, de plus, remarqué qu'une des méthodes les plus efficaces pour réaliser des gains environnementaux et économiques dans ce genre d'infrastructures est de faire baisser la consommation électrique ou de produire celle-ci à l'aide d'une installation photovoltaïque. Finalement, il est montré que l'utilisation de matériaux bio-sourcés dans ce genre de construction permet de diminuer fortement son impact environnemental mais est moins rentable sur une période de 50 ans que l'utilisation d'isolants synthétiques.

C. Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier Monsieur Shady Attia, mon promoteur, pour le temps qu'il m'a consacré et pour ses nombreux conseils tout au long de cette année. Son expertise et sa disponibilité ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Je souhaite ensuite remercier Monsieur Guirec Ruellan pour ses relectures approfondies de mon travail et ses nombreux feedbacks.

Je tiens également à remercier Madame Sigrid Reiter et Monsieur Michel Prégardien, les membres de mon jury, pour le temps qu'ils consacreront à la lecture de mon travail.

Pour terminer, je tiens à remercier ma famille et Marie pour leur soutien continu et en particulier mes parents pour les nombreuses relectures de ce mémoire.

D. Table des matières

A. Abstract	i
B. Résumé	ii
C. Remerciements	iii
D. Table des matières	iv
E. Liste des figures	vii
F. Liste des tables	viii
1. Introduction	1
1.1. Constat environnemental	1
1.2. Constat économique.....	2
1.3. Intérêt	3
1.4. Objectifs de ce mémoire	4
2. État de l'art	5
2.1. Recherches bibliographiques	5
2.2. Step2Sport	7
2.3. Knowledge gap.....	10
2.4. Analyse du coût du cycle de vie	11
2.5. Analyse du cycle de vie.....	13
3. Méthodologie générale	20
3.1. Approche de la problématique et questions de recherche	20
3.2. Variables et indicateurs	21
3.3. Organisation du travail.....	22
3.4. Déroulement de l'étude.....	24
4. Méthodologie pour l'étude du confort	27
4.1. Calcul de la surchauffe dans la PEB (PER).....	27
4.2. Adaptation du calcul au cas d'un hall sportif	27
4.3. Utilisation de l'indicateur de surchauffe.....	28
5. Méthodologie pour l'analyse du coût du cycle de vie	29
5.1. Norme et définition des limites	29
5.2. Données utilisées	29
5.3. Éléments de calcul	31
5.4. Paramètres économiques pour l'actualisation des coûts	32
5.5. Coûts de l'énergie.....	36
5.6. Hypothèses.....	37
6. Méthodologie pour l'analyse du cycle de vie	38
6.1. Choix des phases et de l'indicateur.....	38
6.2. Données utilisées	38
6.3. Émissions de gaz à effet de serre dues aux consommations énergétiques	39

6.4.Hypothèses.....	40
6.5.Monétisation	42
6.6.Analyse de la sensibilité.....	42
7. Présentation du cas d'étude	43
7.1.Choix du bâtiment de référence	43
7.2.Description générale	44
7.3.Système constructif	45
7.4.Techniques spéciales	46
8. Modélisation dans DesignBuilder (EnergiePlus)	48
8.1.Paramétrage	48
8.2.Simulation	54
8.3.Validation et calibration du modèle	54
8.4.Analyse de la sensibilité et de l'incertitude du cas de base	55
9. Résultats - Consommation énergétique et confort du cas d'étude	59
9.1.Étude du confort du cas d'étude.....	59
9.2.Consommation énergétique du cas d'étude.....	59
9.3.Validation du modèle à l'aide de la littérature	59
9.4.Analyse de la sensibilité et de l'incertitude du modèle (SA et UA).....	60
10. Caractérisation des scénarios de l'étude	63
10.1.Choix des composants	63
10.2.Description des composants.....	65
10.3.Description des scénarios	70
11. Résultats - Consommation énergétique et confort des scénarios	73
11.1.P1 - Énergie et confort - "Toiture végétalisée".....	73
11.2.P2 - Énergie et confort - "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages"	74
11.3.P3 - Énergie et confort - "Sur-isolation PIR et vitrages"	75
11.4.S1 - Énergie et confort - "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque"	76
11.5.C1 - Énergie et confort - "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur"	77
11.6.C2 - Énergie et confort - "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement"	78
11.7.Comparaison énergétique et du confort des scénarios.....	79
12. Résultats - Analyse du coût du cycle de vie	82
12.1.ACCV du cas d'étude (B0).....	82
12.2.ACCV du scénario "Toiture végétalisée" (P1)	84
12.3.ACCV du scénario "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages" (P2)	85
12.4.ACCV du scénario "Sur-isolation PIR & vitrages" (P3)	86
12.5.ACCV du scénario "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque" (S1)	87
12.6.ACCV du scénario "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur" (C1)	88
12.7.ACCV du scénario "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" (C2).....	89
12.8.Conclusion de l'étude économique	90
13. Résultats - Analyse du cycle de vie	93
13.1.ACVC du cas d'étude (B0).....	93
13.2.ACVC du scénario "Toiture végétalisée" (P1).....	95
13.3.ACVC du scénario "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages" (P2).....	96
13.4.ACVC du scénario "Sur-isolation PIR & vitrages" (P3).....	97

13.5.ACV du scénario "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque" (S1).....	98
13.6.ACV du scénario "Isolation bio-sourcée & PAC" (C1).....	99
13.7.ACV du scénario "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" (C2)	100
13.8.Conclusion de l'étude environnementale	101
14. Comparaison des résultats	105
14.1.Résumé et comparaison des résultats	105
14.2.Constatations et remarques	106
14.3.Conclusion.....	107
15. Discussion	108
15.1.Découvertes principales et recommandations	108
15.2.Forces et limitations	111
15.3.Implication et ouvertures	113
16. Conclusion	115
G. Références	ix
H. Annexes	xvi

E. Liste des figures

Figure 2.01 : Analyse du cycle de vie - phases et modules.....	15
Figure 3.01 : Plan de travail.....	22
Figure 7.01 : Principaux cas d'étude potentiels.	43
Figure 7.02 : Plan intérieur du cas d'étude.	44
Figure 7.03 : Coupe du cas d'étude.....	45
Figure 8.01 : Cas d'étude modélisé dans DesignBuilder	52
Figure 9.01 : Résultats des études de sensibilités à 100 itérations (gauche) et 250 itérations (droite).....	61
Figure 9.02 : Résultats de l'études de sensibilités à 500 itérations	61
Figure 9.03 : Répartition des résultats énergétiques (500 itérations)	62
Figure 11.01 : P1 - Répartition de la consommation énergétique	74
Figure 11.02 : P2 - Répartition de la consommation énergétique	75
Figure 11.03 : P3 - Répartition de la consommation énergétique	75
Figure 11.04 : S1 - Répartition de la consommation électrique	76
Figure 11.05 : C1 - Répartition de la consommation électrique	77
Figure 11.06 : C2 - Répartition de la consommation énergétique.....	78
Figure 11.07 : Comparaison des consommations énergétiques des six scénarios et du cas d'étude	79
Figure 11.08 : Comparaison des résultats de surchauffe des six scénarios et du cas d'étude	79
Figure 12.01 : Coût B0 - Cas d'étude.....	82
Figure 12.02 : Coût B0 - ACCV complète	83
Figure 12.03 : Coût P1 - toiture végétalisée	84
Figure 12.04 : Coût P2 - Sur-isolation bio-sourcée et vitrages.....	85
Figure 12.05 : Coût P3 - Sur-isolation PIR et vitrages.....	86
Figure 12.06 : Coût S1 - Pompe à chaleur et installation photovoltaïque.....	87
Figure 12.07 : Coût C1 - Isolation bio-sourcée et pompe à chaleur.....	88
Figure 12.08 : Coût C2 - Installation photovoltaïque, enfouissement et vitrages	89
Figure 12.09 : Comparaison des coûts globaux.....	91
Figure 12.10 : Comparaison des différences entre coûts des scénarios et du cas de base	91
Figure 13.01 : GWP monétisé - Cas d'étude.....	93
Figure 13.02 : GWP monétisé - Toiture végétalisée	95
Figure 13.03 : GWP monétisé - Sur-isolation bio-sourcée et vitrages	96
Figure 13.04 : GWP monétisé - Sur-isolation PIR et vitrages	97
Figure 13.05 : GWP monétisé - Pompe à chaleur et installation photovoltaïque	98
Figure 13.06 : GWP monétisé - Isolation bio-sourcée et pompe à chaleur	99
Figure 13.07 : GWP monétisé - Installation photovoltaïque, vitrages et enfouissement	100
Figure 13.08 : Comparaison des coûts environnementaux.....	101
Figure 13.09 : Résultats de l'étude de sensibilité des coûts environnementaux	103
Figure 14.01 : Comparaison des résultats de coûts	105
Figure 14.02 : Comparaison des résultats de coûts totaux et de confort.....	106

F. Liste des tables

Table 2.01 : Liste des mesures mises en avant dans Step2Sport	9
Table 2.02 : Liste des indicateurs potentiels d'une ACV	17
Table 3.01 : Liste des variables dépendantes étudiées dans ce travail.....	21
Table 5.01 : Évolution annuelle de l'inflation.....	33
Table 5.02 : Évolution annuelle de l'indice ABEX	34
Table 5.03 : Évolution annuelle des prix de l'électricité	34
Table 5.04 : Évolution annuelle des prix du gaz	35
Table 5.05 : Évolution annuelle du taux d'intérêt nominal à long terme	36
Table 5.06 : Tableau récapitulatif des paramètres économiques	36
Table 5.07 : Tableau récapitulatif des tarifs énergétiques	37
Table 6.01 : Évolution du facteur de conversion de la consommation en CO2e.....	40
Table 7.01 : Récapitulatif de l'encodage des parois.....	47
Table 8.01 : Composition de l'année météorologique typique dans le fichier "Beauvechain"	49
Table 8.02 : Dates de début et durée des vacances considérées	50
Table 8.03 : Éclairement horizontal minimum pour un hall destiné à l'athlétisme	53
Table 8.04 : Choix des variables pour l'analyse de sensibilité	56
Table 10.01 : Liste des composants étudiés	64
Table 10.02 : CP2a - Sur-isolation bio-sourcée - détail des parois modifiées.....	66
Table 10.03 : CP2b - Isolation bio-sourcée - détail de la paroi modifiée.....	67
Table 10.04 : CP3 - Modification des parois.....	67
Table 10.05 : Composition et coût des scénarios de l'étude	71

1. Introduction

La réalisation de ce mémoire part d'un double constat. Le premier est environnemental tandis que le deuxième est économique. Leur influence sur le choix du sujet de ce mémoire et sur ses objectifs est mis en avant au travers de cette section.

1.1. Constat environnemental

En effet, le réchauffement climatique n'est plus à présenter aujourd'hui et l'impact de l'activité humaine sur celui-ci est prouvé (Ministère de la transition écologique, 2018).

De nombreux scientifiques estiment qu'une augmentation de plus de 2°C par rapport au niveau de la période pré-industrielle (1850-1900), considéré comme le niveau de référence, "entraînerait des dommages irréversibles à nos écosystèmes" (UN.org, 2021). Pour éviter d'en arriver là, l'accord de Paris (2015, environ 190 pays) a pour ambition de maintenir cette augmentation sous les 1,5°C (Commission européenne, 2021b). Il reste cependant peu de temps. L'Organisation Mondiale de la Météorologie (en anglais: World Meteorological Organization¹) a en effet publié en 2019 un rapport sur l'accélération du changement climatique durant la période 2015-2019. Dans celui-ci, elle indique que ces cinq années ont été les plus chaudes jamais enregistrées. Il est ainsi acquis que la température globale moyenne est déjà augmentée de 1,1°C par rapport à la période pré-industrielle (WMO, 2019). L'ONU estime que si rien n'est fait pour diminuer nos émissions, le réchauffement pourrait atteindre des valeurs supérieures à 3°C dès 2100. Les conséquences seraient alors dramatiques aussi bien pour la faune et la flore que pour la société en général (famine, inondation,...) (UN.org, 2021).

Un nouveau rapport de WMO publié le 27 mai 2021 indique que, bien qu'il soit très peu probable (10%) que la température moyenne de la période 2021-2025 dépasse une augmentation de 1,5°C (par rapport au niveau de référence), il y a plus de 40% de chance qu'une de ces années atteigne cette valeur. Pire encore, cette probabilité a doublé en seulement un an (WMO, 2021). Une action immédiate et forte est donc primordiale pour éviter le point de non-retour. Des actions dans tous les secteurs semblent donc indispensables.

La commission européenne a, dans ce but, défini une série d'objectifs environnementaux à atteindre. Deux échéances sont visées: 2030 et 2050. Pour la première, les objectifs actuels (votés en 2014) sont: "une baisse de 40% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'année de référence (1990), une augmentation de la part des énergies renouvelables à 32% et une amélioration de 32,5% de l'efficacité énergétique" (Commission européenne, 2014 & Commission européenne, 2021a). Ces objectifs devraient cependant être revus à la hausse. En effet, une proposition de modification de la législation pour viser 55% de diminution des émissions des gaz à effet

¹ The World Meteorological Organization is the United Nations System's authoritative voice on Weather, Climate and Water.

de serre devrait être votée en juillet 2021 (Commission européenne, 2021a). Pour la deuxième échéance (2050), la commission européenne vise à atteindre une baisse de 80 à 95% des émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990 (Commission européenne, 2014). Afin d'atteindre ces niveaux, l'UE compte sur une collaboration des états membres et une participation sans faille de tous les secteurs.

De tous les secteurs, le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie. Il se place devant les industries et le transport. L'institut européen pour les performances des bâtiments (BPIE - Building Performance Institute Europe) estime qu'il est responsable d'environ 40% des consommations énergétiques et 36% des émissions de CO₂ de l'Union (BPIE, 2020). Il consiste donc en une cible prioritaire à considérer pour diminuer les émissions totales.

Les infrastructures sportives représentent 10% de la consommation énergétique du secteur du bâtiment en Europe (Step2Sport, 2017a). Avec un patrimoine bâti vieillissant représentant près de 8% des bâtiments dans certaines régions d'Europe, le domaine sportif a un travail important à réaliser dans le but de rendre les objectifs européens atteignables (Step2Sport, 2017b). Depuis quelques années, l'attention portée au caractère "sustainable" des larges complexes sportifs, tels que les stades ou autres halls sportifs destinés à recevoir des événements majeurs (coupe du monde, jeux olympiques,...) est grandissante (Kellison et Hong, 2015; Aquino et Nawari, 2015). Elle est d'ailleurs devenue un des critères importants mis en avant par les villes candidates à l'accueil des jeux olympiques (Kellison et Hong, 2015).

Différentes solutions pour diminuer l'impact environnemental de ces infrastructures ont été étudiées et mises en avant dans la littérature. On peut ainsi citer les travaux de Furmanek et Zima (2015) sur les compositions des murs ou encore de Nizetic (2018) sur l'intégration de pompes à chaleur. De plus Step2Sport, un projet co-financé par la Commission Européenne, propose une série d'éléments qu'il est intéressant d'implanter lors de la rénovation d'un bâtiment sportif afin d'en améliorer le comportement environnemental (Step2Sport, 2015a). Des initiatives propres à la Belgique existent aussi. Ainsi, en 2011, la Wallonie a publié un guide visant à aider les concepteurs de halls sportifs à créer des établissements plus économes en énergie (Matriciel, 2011). Sans mise à jour de celui-ci depuis sa première publication, ses recommandations ont cependant perdu en pertinence vu l'évolution des normes et des technologies ces dernières années.

1.2. Constat économique

Le deuxième constat motivant ce travail est un constat économique. Un grand nombre de clubs de sport en Belgique sont en difficulté financière. Avec seulement 0,5% du budget de la fédération Wallonie-Bruxelles qui est consacré à ce secteur, un grand nombre d'entre eux ont du mal à engager du personnel qualifié ou à s'équiper adéquatement (AISF, 2019). Il peut être affirmé sans grand doute que la situation post crise sanitaire sera pire.

Dans ces conditions, il est évident que pour beaucoup de clubs, publics et privés, relatifs à des disciplines sportives variées, faire construire des infrastructures intérieures représente un challenge budgétaire important. Celles-ci sont pourtant primordiales. Il est en effet prouvé qu'il existe un lien entre la qualité des équipements et les performances des athlètes (AISF, 2019). Dans un contexte toujours plus compétitif, chaque détail est important pour attirer les athlètes de haut niveau et leur permettre de progresser mais aussi pour pouvoir ouvrir le sport à tous, par tous les temps. Plus un club parviendra à attirer des affiliés, plus il pourra prospérer et investir. De plus, un lien fort a également été détecté entre la proportion de personnes pratiquant un sport dans un pays et le bien être moyen exprimé par les habitants de celui-ci (Pil Lee et al., 2013).

Avec cette difficulté importante déjà inhérente à la construction d'infrastructures "basiques", la question de l'ajout d'un caractère environnemental à ces constructions se pose. Intégrer des mesures écologiques représente un investissement initial supplémentaire souvent important. Autant cet investissement supplémentaire est facilement admissible dans les projets de grande ampleur, au vu des budgets qui y sont accordés (stade,...), autant les subsides et fonds propres très limités des clubs plus petits ne le leur permettent pas (Kellison et Hong, 2015).

1.3. Intérêt

À partir de ce double constat environnemental et économique, il semble évident qu'une amélioration de la durabilité des halls sportifs est nécessaire et possible. Elle doit cependant être menée avec une attention financière importante, un élément absent des recommandations de l'étude de Step2Sport ou encore du guide wallon de 2011; ceux-ci se concentrant uniquement sur l'aspect énergétique.

L'intérêt de rendre ces salles plus performantes est grand. Il y a tout d'abord un aspect économique sur le long terme, grâce, majoritairement, aux économies d'énergies qui sont réalisées. Cet aspect est d'ailleurs la raison principale exprimée par les concepteurs d'infrastructures plus respectueuses de l'environnement pour avoir choisi de construire ce type de bâtiment (Kellison et Hong, 2015; Step2Sport, 2017b). Le deuxième aspect est évidemment écologique: ce type de construction permet de limiter les consommations d'énergie non-renouvelable et les émissions de gaz à effet de serre. Enfin, l'apport d'un caractère environnemental de qualité est très intéressant car il est prouvé qu'un bâtiment de ce type diminue les problèmes respiratoires et les allergies et améliore les performances des utilisateurs (Gibson et al., 2008; BPIE, 2020). Vu l'activité sportive accueillie par les infrastructures ici considérées, cet apport est d'autant plus important.

Pour ces différentes raisons, il semble opportun d'étudier le sujet des infrastructures sportives à budget limité mais présentant une véritable réflexion environnementale. Ce sujet est de plus d'actualité, avec des normes toujours plus contraignantes et des échéances (2030, 2050) approchant. C'est aujourd'hui qu'il faut réagir pour assurer l'avenir.

1.4. Objectifs de ce mémoire

L'objectif au travers de ce travail va donc être de déterminer quelles sont les mesures à prendre en priorité pour obtenir des infrastructures sportives indoors qui soient davantage durables tout en maintenant un budget limité. Pour ce faire, il est décidé d'utiliser une approche par scénarios. Ces scénarios, qui regrouperont des mesures à but écologique, seront appliqués à un hall sportif jouant le rôle de "cas d'étude". Ils seront ensuite comparés et classés sur base des impacts qu'ils ont sur l'environnement, le coût global et le confort.

Afin de pouvoir exprimer des conclusions et recommandations pertinentes et précises, le champs des infrastructures sportives considérées est restreint. Il est en effet évident que ce qui sera le plus optimal pour une piscine publique ne le sera pas forcément pour un hall de gym/d'athlétisme ou encore pour une patinoire. Puisque les halls sont plus généraux et nombreux, c'est vers eux que ce travail se tourne.

En particulier, le cas d'étude choisi consistera en une infrastructure sportive indoor destinée à l'athlétisme. Spécifier la destination si précisément est nécessaire pour pouvoir se référer aux bonnes normes de construction durant le travail. Ces halls ont l'avantage d'être très polyvalents grâce à leurs dimensions et peuvent donc convenir à d'autres sports en cas de réaffectation future. C'est également un choix personnel de l'auteur qui pourra ainsi recourir à sa connaissance du domaine pour enrichir le travail. La construction de ce type de salle est de plus en plus en plein boom, montrant l'intérêt d'agir maintenant. Ainsi, 50% des halls d'athlétisme belges ont été construits ces cinq dernières années (lbfa.be, 2021; val.be, 2021). Plusieurs nouveaux sont également en préparation, notamment pour le club d'athlétisme de Seraing. Avec les avantages amenés par ce type d'infrastructure pendant les périodes hivernales, de plus en plus de clubs vont chercher à y avoir accès afin de conserver un niveau aussi compétitif que possible. Ceci illustre l'intérêt de réfléchir à un moyen de construction de ceux-ci qui soit plus écologique et économique.

Le contexte dans lequel se place ce travail a été décrit en détail et les avantages et points d'attention principaux liés à ces infrastructures rurales ont été énoncés. Les objectifs poursuivis ont également été présentés, tout comme leur pertinence. La suite de ce travail va donc se diviser en quatre parties. Tout d'abord un état de l'art sera dressé pour rendre compte des recherches déjà existantes sur ce domaine. Ensuite une deuxième large partie sera consacrée à l'explication et au développement de la méthodologie suivie dans ce travail. Les analyses du confort, du coût du cycle de vie et du cycle de vie réalisées seront ainsi détaillées pour permettre une réplification potentielle future. Les étapes de modélisation dans le programme DesignBuilder (EnergiePlus) y seront également présentées. La troisième partie sera consacrée à la présentation des résultats des différentes analyses menées. Finalement, la dernière partie de ce travail consistera en la discussion de ces résultats. Des recommandations seront ensuite mises en évidence de manière à orienter les concepteurs de hall sportifs vers les meilleures mesures à prendre pour rendre leur projet de construction plus durable sans rendre l'investissement inaccessible. Ce travail espère ainsi apporter sa pierre à l'édifice menant à une diminution de l'impact des activités humaines sur le climat.

2. État de l'art

Cette section commence par une mise en contexte du thème de ce mémoire à l'aide de la littérature. Peu de références spécifiquement dédiées à la construction de centres sportifs ont été dégagées suite à la recherche bibliographique. Quelques publications récentes et dont l'objet est proche du sujet développé dans ce mémoire existent malgré tout. Les principales vont être mentionnées ici. Par ailleurs, les résultats et recommandations d'une étude de large ampleur, intitulée "STEP by STEP renovation towards Nearly Zero Energy SPORT Buildings (step2sport, 2017b)" et co-financée par le programme "Intelligent Energy Europe" de la Commission Européenne, sont décrits. Ces références apportent des éléments qui seront exploités plus tard dans ce travail. Elles permettent également de mettre en évidence les lacunes principales identifiées dans la littérature. A partir de celles-ci, une série de questions de recherche auxquelles ce tfe tentera de répondre est élaborée. Ce chapitre se termine par une présentation des principaux concepts et théories rencontrés dans ce travail. Les analyses du coût du cycle de vie et du cycle de vie seront ainsi introduites et leur fonctionnement explicité.

2.1. Recherches bibliographiques

Les techniques de construction et de rénovation évoluent sans cesse et s'adaptent de manière régulière aux nouvelles attentes et normes relatives à l'efficacité énergétique et aux impacts environnementaux. Dans un tel domaine en évolution technologique et sociologique constante, il semble pertinent de restreindre la recherche de références à une période relativement récente (en l'occurrence les cinq dernières années) afin d'obtenir des éléments utiles par rapport aux performances attendues de nos jours. Par ailleurs, ce tfe présente deux aspects à prendre en compte dans la recherche bibliographique. Tout d'abord, c'est une nouvelle construction qui est envisagée ici plutôt qu'une rénovation. Les possibilités techniques envisageables dans le cadre d'une construction sont plus larges que celles possibles dans le contexte d'une rénovation, mais les articles scientifiques décrivant les divers challenges liés aux rénovations semblent nettement plus nombreux que ceux relatifs à de nouvelles constructions. Deuxièmement, c'est la construction d'une salle de sport qui est visée ici et la spécificité des infrastructures sportives (type de bâtiment, type d'usage, attentes spécifiques en termes de confort...) implique que les stratégies de construction proposées dans des articles analysant les impacts environnementaux et l'efficacité énergétique de zones résidentielles, d'affaires ou commerciales, ne sont pas nécessairement applicables au cas d'étude envisagé.

L'article de Furmanek et Zima (2015) combine les deux contraintes (construction et hall sportif). En se focalisant sur la nouvelle construction d'un centre sportif en Pologne, les auteurs comparent les coûts de plusieurs variantes concernant les matériaux des murs (notamment la conductivité thermique et l'épaisseur de l'isolation) et les types de fenêtres. Cette analyse des coûts est combinée à une étude de l'énergie nécessaire pour chauffer et ventiler. D'autres références combinent également les deux aspects en question mais se focalisent sur la construction d'un type bien spécifique de centre sportif, par exemple des halls temporaires sous forme de "bulles" comme dans Nord et al. (2015).

Certaines références intéressantes ne traitent également que d'une sous-thématique bien précise. Par exemple l'article de Nizetic (2018), centré sur la rénovation d'un complexe sportif, mesure essentiellement les bienfaits énergétiques d'une rénovation du système de chauffage via des pompes à chaleur de différents types. De même, l'acte de conférence de Accili et al. (2016), complété de la thèse de master de Accili (2016) réalisée sous la supervision de Jaime Arias Hurtado, se focalisent sur les systèmes de ventilation des infrastructures sportives.

Néanmoins, même si elles concernent plutôt des rénovations de halls sportifs ou d'autres types de buildings ou si elles se focalisent sur un seul aspect technique, certaines références apportent des éléments intéressants, notamment méthodologiques par rapport à l'étude menée dans ce tfe. Par exemple, dans les études de Nizetic (2018) et Pitarch et al. (2020), les auteurs procèdent en plusieurs étapes: choix du cas d'étude (à rénover), collecte des caractéristiques et de données spécifiques sur ce cas d'étude (fréquentation, consommations,...), description de scénarios (de rénovation) possibles, choix des critères à évaluer et finalement quantification des gains et proposition de recommandations. Dans le cas de Nizetic, la quantification des gains prend la forme d'une étude économique avec actualisation des coûts, portant uniquement sur les consommations énergétiques, tandis que Pitarch, qui étudie la rénovation de toitures, réalise lui aussi une étude économique mais portant cette fois sur tous les coûts du cycle de vie. Il accompagne de plus cette étude d'une étude environnementale (diminution de l'impact carbone).

Une procédure basée sur une évaluation combinée des coûts et des gains environnementaux est également mise en place dans l'article de Suman et al. (2020). Dans celui-ci, les auteurs se basent sur la rénovation d'une zone de bureaux (leur cas d'étude) pour tester différentes techniques de rénovation durable trouvées dans la littérature. Ils évaluent et classent ces différentes techniques sur base de différentes normes internationales.

En ce qui concerne la méthodologie, les références mentionnées ci-dessus de Accili et ses co-auteurs (2016) présentent un aspect complémentaire également considéré dans ce tfe. En effet, ces auteurs cherchent à déterminer quels gains peuvent être obtenus en utilisant la ventilation naturelle plutôt qu'un système mécanique dans un hall sportif en Espagne. Les gains considérés correspondent à une amélioration du confort (via le respect des températures de confort et la limitation de la concentration de CO₂ notamment), à une diminution de la consommation énergétique et à l'impact économique sur le long terme. Ils suivent donc une approche concentrée sur trois objectifs: confort-énergie-coût. Une stratégie particulièrement intéressante puisqu'elle correspond à la vision que l'Europe invite à observer (BPIE, 2020). Ainsi, un descriptif plus détaillé de la thèse de master (l'acte de conférence en proposant un résumé) paraît utile. Après réalisation d'un état de l'art portant, notamment, sur l'analyse d'un hall sportif N-ZEB en Allemagne, les auteurs ont sélectionné un hall sportif en Catalogne comme cas d'étude pour la suite de leurs études. Une campagne de mesures a été effectuée au niveau des températures, des niveaux d'humidité et de la concentration de CO₂. Le taux d'occupation de la salle aux différentes heures a également été enregistré pendant cette période d'observation.

Une fois le cas d'étude caractérisé, les auteurs ont créé six nouvelles versions légèrement adaptées de celui-ci. Trois de celles-ci comportent un système de ventilation mécanique tandis que les trois autres recourent à la ventilation naturelle. Les autres différences entre les versions comprennent, entre autres, le système de chauffage utilisé, la capacité de contrôle sur la ventilation (sur l'ouverture des entrées d'air naturel pour les cas à ventilation naturelle ou sur les débits fournis pour la ventilation mécanique). Leur objectif était de déterminer si l'implantation d'un système de ventilation naturelle est nécessairement avantageuse (selon leur approche confort-énergie-coût) pour tous les halls sportifs en Espagne ou si le bienfait éventuel dépend des caractéristiques des systèmes de ventilation envisagés et/ou des particularités techniques des halls.

Bien que ce soit la méthodologie exploitée dans ce travail qui soit principalement intéressante pour ce tfe, les résultats peuvent être précisés. Les auteurs trouvent ainsi que les coûts globaux les plus bas sont obtenus lorsqu'un système de ventilation naturelle est utilisé. Ils confirment également, entre autres, l'intérêt que ce type de système représente pour éviter la surchauffe et améliorer la qualité de l'air intérieur. Deux figures représentatives de leurs résultats sont disponibles à l'*Annexe 1*.

2.2. Step2Sport

En dehors des articles publiés dans des revues scientifiques, un des principaux travaux sur ce domaine est l'étude de large ampleur "Step2Sport" commandée par l'UE et la commission européenne². Elle a été menée de 2014 à 2017. Au travers de celle-ci, les chercheurs cherchent à déterminer quels procédés de **rénovations** de halls sportifs sont pertinents afin de diminuer leur consommation énergétique. L'objectif étant de leur faire **atteindre le niveau zéro énergie**.

Le rapport de ce projet commence par un état de l'art. Les chercheurs ont répertorié tous les halls sportifs, gymnases et autres piscines publiques existant dans les 27 pays européens afin d'obtenir les caractéristiques de ceux-ci. Ils reprennent également dans l'état de l'art les différentes normes et certifications que les infrastructures sportives doivent remplir selon le pays d'installation. Sur base du relevé, 27 bâtiments de 7 pays ont été sélectionnés et les gestionnaires correspondants ont accepté de participer à l'étude. Les bâtiments sont situés en Bulgarie, Espagne, Grèce, Italie, Pologne, Portugal et Suède. Ils ont, pour la plupart (12 des 27), été construits avant 1986 et 5 autres avant 1995.

Un audit énergétique des 27 cas d'études a été réalisé tout comme un plan de rénovation énergétique de ceux-ci "step by step". Durant les mois suivants, les travaux ont été effectués sur les différentes infrastructures à l'aide de financements européens. Finalement, un nouvel audit énergétique a été effectué afin de quantifier les gains obtenus grâce à la rénovation.

² Les références suivantes sont utilisées pour cette section: (step2sport, 2015a; 2015b; 2017a; 2017b)

À l'occasion de la présentation publique de 2017, les différents responsables de l'étude ont présenté les résultats du projet. Ceux-ci peuvent être séparés en deux types: les résultats des rénovations des cas d'étude et les recommandations pour faire atteindre le niveau zéro énergie à un complexe sportif via sa rénovation. Ces recommandations sont particulièrement utiles pour ce tfe. Ces résultats et recommandations sont présentés ci-dessous.

- Résultats des rénovations énergétiques

Les auteurs du projet auront dépensé jusqu'à 2 millions d'euros par projet de rénovation pour atteindre leurs objectifs. Cette dépense permet depuis l'économie annuelle de plus de 12 millions de kWh d'énergie finale. Cela représente une baisse de 60%. Il est, cependant, important de noter que toutes les infrastructures n'ont pas été impactées de la même façon. L'étude montre ainsi que le type d'infrastructure (présence d'une piscine, d'une patinoire,...), le climat dans lequel le bâtiment est implanté et le budget octroyé pour la rénovation font tous les trois fortement varier les gains qu'il est possible d'obtenir.

- Recommandations

Les chercheurs publient dans leur rapport final un guide en cinq étapes sur comment rénover une infrastructure sportive pour la rendre "zéro énergie".

- A. Réaliser un audit énergétique du bâtiment pour observer l'état actuel des consommations et à quoi elles sont dues. Sur base de celui-ci, les zones à améliorer en priorité doivent être définies.
- B. Un plan d'action doit être établi. Il reprend les différents besoins de rénovations observés lors de l'audit et les planifie dans le temps (court, moyen ou long terme). Il doit être cherché aussi bien à réduire les consommations énergétiques qu'à ajouter une capacité de production renouvelable d'énergie.
- C. Une fois les besoins établis, il faut prévoir leur financement. Ils conseillent pour ce faire de recourir à la demande de subsides, de "crowdfunding" ou encore d'emprunts. Les coûts à prévoir pour atteindre le niveau zéro énergie étant importants, recourir à différentes sources et planifier les travaux en plusieurs étapes espacées dans le temps seront régulièrement nécessaires.
- D. Lorsqu'il est temps de préciser les techniques/produits à intégrer dans le projet de rénovation, il est intéressant de les choisir parmi la liste des mesures testées dans le cadre de l'étude. Ainsi celles-ci ont déjà été testées et les gains qu'il est possible d'obtenir grâce à elles ont été évalués. Ces différentes mesures avaient été choisies car considérées comme les plus adaptées pour les infrastructures sportives. Il faut cependant garder à l'esprit que les gains sont théoriques et varient fortement selon la nature du bâtiment et sa localisation. Ce qui convient à une patinoire ou à une piscine en Suède ne sera pas forcément aussi bénéfique pour une salle de gymnastique en Espagne. Une synthèse des mesures recommandées est présentée à la *Table 2.01*.
- E. Finalement la rénovation du bâtiment peut avoir lieu et un nouvel audit énergétique réalisé au terme de celle-ci. Les gains peuvent ainsi être confirmés.

Domaine	Mesures	Gains énergétiques
Enveloppe	(Sur-) Isolation des murs et de la toiture avec isolants synthétiques	10 à 33%
	Double et triple vitrages	2 à 22%
	Ombrage	10 à 25% (du besoin de refroidissement)
Ventilation	Echangeur de chaleur	50 à 85%
	Optimisation du système ("à la demande", ventilateurs plus performants,...)	5 à 80%
Eclairage	Utilisation de Led	15 à 60% (de l'énergie pour l'éclairage)
	Favoriser l'éclairage naturel	0 à 75% (de l'énergie pour l'éclairage en journée)
	Optimisation du système (dimmage, timer,...)	20 à 50% (de l'énergie pour l'éclairage)
Production de chaleur	Cogénération et piles à combustible	20 à 35%
	Chaudière à condensation avec rendement optimal	5 à 20%
	Ballon d'eau chaude	15 à 35%
	PAC géothermique	25 à 65%
	Biomasse	2 à 10%
Énergie renouvelable	Panneaux photovoltaïques	40 à 65%
	Panneaux solaires thermiques	à partir de 60% pour une piscine

Table 2.01 : Liste des mesures mises en avant dans Step2Sport
(Sur base de l'étude Step2Sport (2017a))

- Limitations

Le rapport relatif à ce projet européen présente cependant une série de limitations. Les chercheurs considèrent un éventail très large d'infrastructures sportives pour déterminer les gains potentiels qu'auraient diverses mesures énergétiques sur eux. En agrégeant les résultats obtenus pour des établissements aussi différents qu'une piscine publique ou encore une patinoire, les recommandations se font moins spécifiques et donc moins adaptées. De plus, leurs recommandations ne permettent pas de déterminer comment combiner ces mesures efficacement ni lesquelles sont à prioriser. Bien qu'ils reconnaissent les difficultés financières, ils n'en prennent pas compte dans leurs recommandations. Ils n'indiquent ainsi pas quel investissement est le plus opportun et les gains qui sont possibles lorsque le budget est limité. Une autre limitation de leur étude est de ne considérer que les consommations énergétiques sans présenter de réflexion approfondie sur les impacts environnementaux des solutions qu'ils proposent pour les faire baisser.

2.3. Knowledge gap

Les différentes études et publications disponibles dans la littérature offrent trop peu d'informations quand aux meilleures mesures à prendre pour rendre un nouveau hall sportif plus durable d'un point de vue environnemental. Ainsi, un investisseur et son architecte auront comme meilleures options la consultation de l'étude Step2Sport avec ses limitations ou celle du guide wallons (abordé dans l'introduction) dont la pertinence des recommandations n'est plus assurée aujourd'hui. Sur base des limitations posées par la littérature, une série de questions de recherche a été élaborée.

Plusieurs mesures à visée environnementale sont présentées ou recommandées dans la littérature. Celles-ci sont parfois spécifiques au pays concerné (cela peut dépendre du climat ou de contraintes nationales) mais certaines sont relatives aux infrastructures sportives belges. Celles-ci sont cependant conseillées sur base des baisses de consommations énergétiques qu'elles permettent. Il serait pourtant intéressant qu'elles soient évaluées plus globalement, en considérant d'autres variables. Leur impact économique, leur impact sur le confort des utilisateurs ou encore leur impact environnemental auraient ainsi beaucoup de sens à être considérés. Cela permettrait de vérifier que les options proposées pour baisser les besoins énergétiques des halls sportifs ont effectivement un sens selon des analyses plus précises ou pointues.

Ensuite, la littérature ne permet pas de répondre à la question suivante: Est ce plus avantageux, à l'heure actuelle, d'apporter des modifications aux parois du bâtiment ou à ses techniques? En effet, beaucoup d'articles se concentrent sur une stratégie spécifique, limitant ainsi les comparaisons directes entre diverses options. Indiquer dans quel type d'adaptation un futur maître d'ouvrage aurait intérêt à investir un supplément budgétaire serait intéressant. Définir ce "cost-optimum" amènerait à une meilleure rentabilité des investissements et donc à des bâtiments plus performants économiquement et écologiquement. De même, l'avantage d'utiliser des matériaux bio-sourcés semble absent des considérations développées actuellement dans la littérature consacrée aux halls sportifs.

Enfin, les mesures les plus adéquates à choisir pour réduire l'impact environnemental d'un bâtiment pour lequel le budget est fortement limité ne sont pas clairement mises en évidence dans la littérature. Les gains atteignables dans ce cas ne le sont donc pas non plus. L'investissement nécessaire à la construction d'un hall sportif est pourtant un point crucial au vu des finances limitées des clubs et en particulier des privés. Ainsi, ces points peuvent être résumés en trois questions:

- *Quelles sont les mesures constructives les plus avantageuses à mettre en œuvre dans un hall sportif à budget restreint en Belgique et quels gains permettent-elles?*
- *Investir dans les systèmes est-il plus rentable, économiquement et écologiquement, qu'investir dans les parois? Est-ce l'inverse? Ou est ce qu'un équilibre entre les deux est nécessaire?*
- *L'utilisation de matériaux bio-sourcés dans un hall sportif est-elle intéressante d'un point de vue économique et environnemental et pour le confort des usagers?*

Ce sont à ces questions que ce travail tente de répondre à l'aide de techniques actuelles et issues de normes internationales. Il pourra ainsi aider un candidat à la construction d'un hall sportif à budget restreint en Belgique à choisir de façon mieux informée les stratégies durables à intégrer dans son bâtiment afin de satisfaire aussi bien les besoins des sportifs que les intérêts du gestionnaire de l'infrastructure et ceux de l'environnement.

2.4. Analyse du coût du cycle de vie

2.4.1. Généralités

La réalisation d'une analyse du coût du cycle de vie d'un bâtiment a pour but de déterminer l'impact financier total que celui-ci aura sur toute sa durée de vie (Allacker, 2010). La réalisation d'une telle analyse est intéressante pour plusieurs raisons. Tout d'abord elle permet de déterminer le coût optimal. Celui-ci est défini par BPIE (2013) comme étant "le niveau de performance énergétique qui amène aux coûts économiques les plus faibles durant la durée estimée du cycle de vie". Elle permet également d'estimer les coûts qui devront être assumés par le gestionnaire du bâtiment durant la vie du bâtiment. L'étude prend en effet compte, outre de l'investissement initial, d'autres frais comme ceux liés à la maintenance ou encore aux coûts de remplacement des systèmes et produits.

La réalisation d'une analyse du coût du cycle de vie suit un processus normé. Différentes normes sont disponibles pour l'encadrer. Celle qui sera suivie dans ce travail est la norme européenne EN 15459:2017. Une autre possible aurait été par exemple l'ISO 15686. Les différences entre les deux sont minimes: les coûts rencontrés, bien qu'identiques, sont répartis entre des catégories différentes (elles sont plus nombreuses dans l'ISO). L'écriture des équations varie donc en conséquence. Une seule différence fait que les résultats obtenus avec ces deux normes peuvent varier légèrement: la norme européenne prend en compte des coûts environnementaux. Ceci s'explique par le fait qu'elle ait été spécialement prévue pour accompagner une étude des performances énergétiques des bâtiments. Un désavantage est ainsi accordé aux bâtiments dont la consommation énergétique est importante ou utilise des énergies plus nocives pour l'environnement.

L'objectif de l'étude est de définir la somme d'argent qu'il est nécessaire de posséder au début du cycle de vie du bâtiment afin de pouvoir subvenir à tous les frais qu'il engendrera durant celui-ci (Allacker, 2010; EN 15459-1, 2017). Cependant, il est connu que la valeur de l'argent change avec le temps. Pour cette raison, une étape importante d'une ACCV est l'actualisation des coûts. Celle-ci permet de déterminer le budget qu'il est nécessaire de prévoir aujourd'hui pour pouvoir financer un investissement arrivant ultérieurement par rapport à l'année de début (T0). Pour ce faire, le coût de cet investissement estimé en T0 est multiplié par un facteur économique pour lui appliquer l'inflation et le taux d'escompte.

2.4.2. Éléments considérés

La norme EN 15459-1:2017 classe les coûts en différentes catégories. Ces catégories permettent une compréhension plus aisée des résultats totaux. Il est ainsi directement possible de repérer ce qui amène les coûts les plus importants. Cela permet également de comparer différentes analyses du coût du cycle de vie (ACCV) de bâtiments différents et d'en distinguer plus facilement les avantages respectifs. Au nombre de cinq, les catégories considérées par la norme européenne sont les suivantes:

- Les coûts d'investissements initiaux

Ils correspondent aux frais de construction du bâtiment. Ceux-ci comprennent tous les matériaux et produits mis en œuvre ainsi que les frais d'honoraires et l'utilisation d'eau et d'énergie sur le chantier. Cependant, seuls les frais facturés au maître d'ouvrage doivent être considérés.

- Les coûts de fonctionnement

Cette catégorie comprend le plus grand nombre d'éléments. Elle comprend tout d'abord, les coûts liés aux consommations énergétiques et à l'eau. Les coûts de maintenance et d'entretien des différents systèmes et autres composants du bâtiment doivent également y être considérés. De même, les frais liés au remplacement des éléments en fin de vie sont à prendre en compte dans cette catégorie.

- Les coûts environnementaux

Ceux-ci consistent en la compensation économique des gaz à effets de serre émis par le bâtiment. Ces émissions doivent être calculées à l'aide de la norme européenne EN 15978. Ces coûts sont régulièrement ignorés puisqu'ils incombent à la société et non au gestionnaire de l'infrastructure (Accili, 2016).

- Les coûts de fin de vie

Les coûts de fin de vie comprennent les frais de démantèlement, d'évacuation et de recyclage ou le cas échéant, de mises en décharge des déchets. Ils peuvent être déterminés via un calcul détaillé des coûts de fin de vie de chacun des éléments ou calculés au pourcentage du coût d'investissement total. Dans ce deuxième cas, le pourcentage à considérer varie avec le type de démolition à entreprendre et la nature des déchets qui devront être traités.

- Les valeurs résiduelles

Les coûts à prendre en compte dans cette catégorie sont en réalité des coûts "négatifs": les valeurs résiduelles. Tous comme les coûts de fin de vie, les valeurs résiduelles doivent être évaluées en fin de cycle de vie du bâtiment. Elles doivent être calculées pour chaque élément ou produit dont la durée de vie n'est pas épuisée au terme de la durée du cycle

de vie considéré. Les calculs sont basés sur un "amortissement linéaire du coût d'achat de l'élément ou produit considéré" (EN 15459-1, 2017).

2.5. Analyse du cycle de vie

2.5.1. Généralités

L'analyse du cycle de vie, ACV, permet de déterminer l'impact que le bâtiment a sur l'environnement sur toute sa durée de vie, du berceau à la tombe (*from cradle to grave*) (Reiter, 2010). Pour ce faire, la durée de vie est séparée en 5 phases, elles mêmes divisées en différentes opérations. L'impact est évalué indépendamment pour chacune d'elles sur base d'une série d'indicateurs. La réalisation d'une ACV suit une méthodologie standardisée. Différentes normes peuvent être suivies. Les principales sont les normes EN 15804 (niveau produit) et 15978 (niveau bâtiment) et l'ISO 14040.

Les ACV sont fort utilisées dans le secteur du bâtiment pour déterminer les meilleures pratiques en termes de stratégies environnementales. Elles permettent de comparer différents systèmes ou options constructives sur tout leur cycle de vie ou simplement sur certaines phases de celui-ci (Reiter, 2010).

2.5.2. Les phases du cycle de vie

Dans les normes européennes (EN 15804, 2019; EN 15978, 2012), cinq phases sont définies.

- La phase de production, modules A_1 à A_3

Divisée en trois opérations, cette phase est régulièrement nommée "du berceau à la porte de l'usine" ("*from cradle to gate*") puisqu'elle reprend toutes les émissions produites par l'acquisition des matières premières, leur transport jusqu'à l'usine où elles sont traitées et le processus de fabrication complet des produits. Dans le cadre de l'ACV d'un bâtiment, les données pour cette phase sont habituellement collectées directement dans les fiches de déclaration environnementale des produits (DEP), fiches réalisées suivant la norme EN 15804, ou depuis des bases de données générales comme Ecoinvent ou ICE. Les données sont propres aux produits mis en œuvre et indépendantes du bâtiment.

- La phase de construction, modules A_4 à A_5

Cette deuxième phase comprend les opérations de transport des produits depuis les sites de production jusqu'au chantier ainsi que les émissions produites par l'installation et la vie du chantier. Elle s'étend donc jusqu'à la complétion des travaux et au démantèlement des installations de chantier. Elle prend en compte notamment la réalisation des fondations et des abords, l'utilisation des machines de chantier, la gestion des déchets, la livraison, la transformation, le stockage et l'installation d'un produit,

système ou composant sur le chantier ou encore toutes les consommations d'énergie et d'eau rencontrées. Le transport des personnes n'est par contre, lui, pas pris en compte.

- La phase d'utilisation / d'entretien, modules B_1 à B_7

Cette phase est celle qui s'étend le plus dans le temps, allant de la réception du bâtiment jusqu'à sa fin de vie. Elle comprend trois volets principaux:

- Les émissions "passives" émises durant l'utilisation, module B_1 , couvrent "les émissions de substances" par les différents composants mis en œuvre. Assez peu documentées selon la norme EN 15978, cela correspond par exemple au formaldéhyde libéré par la colle des panneaux OSB.
- Les opérations d'entretien et réparation, modules B_2 à B_5 , comprennent, par exemple, les émissions produites par la production, la livraison et l'installation des produits servant à remplacer des composants en fin de vie ou encore celles dues aux entretiens, inspections et nettoyages des systèmes et espaces.
- Les consommations d'énergie et d'eau durant la vie du bâtiment font l'objet des modules B_6 et B_7 . Pour l'énergie il faut considérer, d'après la norme EN 15978, celle nécessaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation, l'éclairage, la climatisation ainsi que celle nécessaire pour le fonctionnement des auxiliaires (ventilateurs, pompes, ascenseurs, système de sécurité,...). Pour l'eau, sont considérés la quantité utilisée ainsi que les traitements qu'elle nécessite. L'eau nécessaire aux entretiens ne doit pas être prise en compte dans ce module.

- La phase de fin de vie, modules C_1 à C_4

Les émissions produites durant la destruction, la gestion des déchets générés (évaluation des possibilités de réutilisation et recyclage et le cas échéant l'élimination) ainsi que le transport de ceux-ci vers les centres de traitements sont à prendre en compte durant cette phase de fin de vie.

- Les avantages et charges au-delà des frontières du système, modules D

Pour compléter les modules de fin de vie, l'analyse du cycle de vie permet de considérer les opérations existantes en dehors du bâtiment étudié. Cela prend en compte l'impact des processus de recyclage et de réutilisation lorsque ceux-ci existent, résultant en une étude "du berceau au berceau" ("*from cradle to cradle*"). C'est également dans cette phase que l'énergie produite par le bâtiment mais envoyée sur le réseau peut être valorisée.

La *Figure 2.01* résume les différentes phases d'une analyse du cycle de vie. Elle en indique également les noms de tous les différents modules qu'elle comprend.

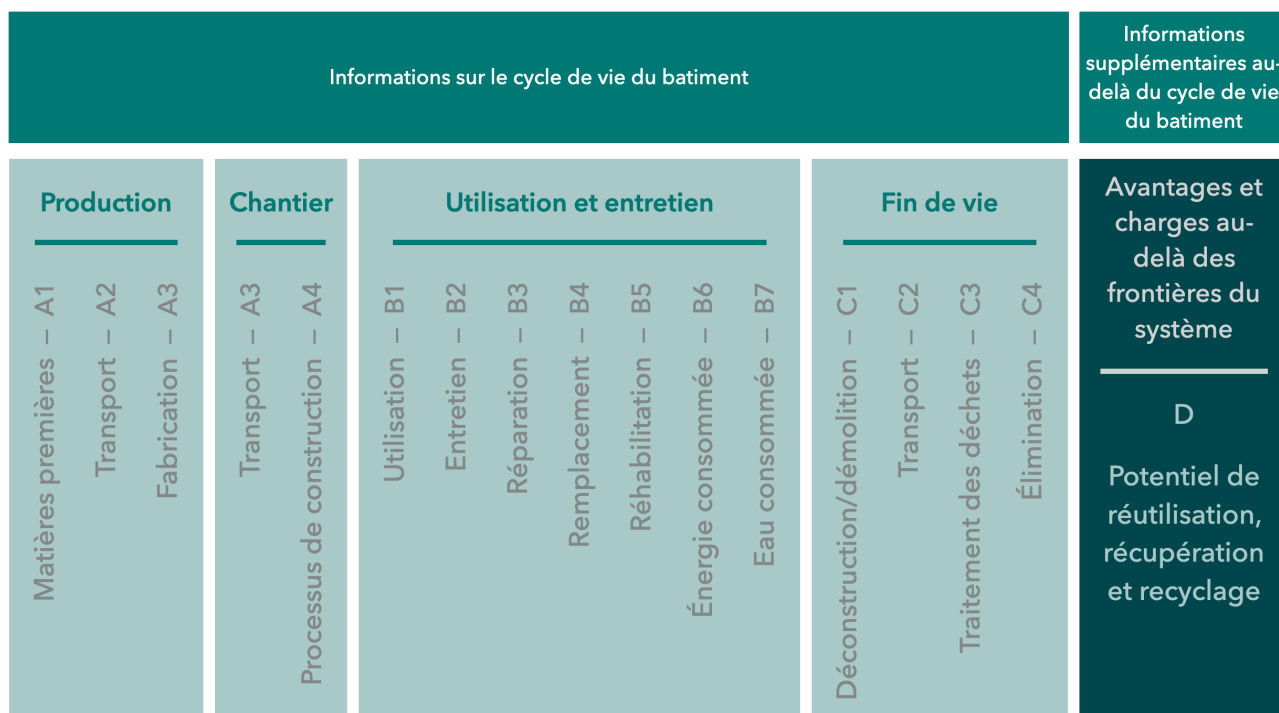


Figure 2.01 : Analyse du cycle de vie - phases et modules
(Sur base de la Figure 3 de la norme EN 15978)

2.5.3. Le processus d'une analyse du cycle de vie

Les différentes normes, comme la norme EN 15978 et l'ISO 14040, proposent chacune leur mode opératoire afin de réaliser une analyse du cycle de vie. Bien que les résultats attendus soient fortement semblables, le séquençage en étapes diffère légèrement. L'ISO présente ainsi 4 grandes étapes tandis que la norme européenne en compte 8. Comme c'est cette dernière qui est utilisée dans ce travail, ce sont les 8 étapes correspondantes qui vont être succinctement présentées.

- Identification du but de l'évaluation

La première étape est évidemment de définir pourquoi on réalise une analyse du cycle de vie. La norme EN 15978 (2012) prévoit quatre raisons principales:

- Pour comparer l'impact environnemental de différentes options constructives
- Pour prouver que le bâtiment respecte une norme légale donnée
- Pour servir à vanter les mérites d'un bâtiment
- À des fins de soutiens politiques.

Selon le but, les calculs resteront les mêmes mais les données et la qualité des données requises en entrées pourront, elles, changer. Cette étape et la suivante sont très importantes lors de la réalisation d'une ACV (Reiter, 2010).

- Spécification de l'objet de l'évaluation

Une fois le but défini, il faut déterminer ce qui fait et ne fait pas partie de l'étude. Il s'agit des frontières de l'étude. L'analyse peut porter sur tout un bâtiment, aménagement des abords compris, ou se limiter à une partie, à un système. Elle peut se limiter à certaines phases ou être réalisée "from cradle to cradle". L'important est de le préciser pour permettre l'interprétation de l'ACV et sa comparaison à d'autres analyses du même type.

Par défaut une ACV complète est réalisée sur la durée de vie totale du bâtiment. S'il est souhaité de réaliser l'étude sur une période plus courte, cette décision et la durée choisie doivent être clairement énoncées et justifiées. De même, s'il est souhaité d'analyser uniquement l'impact de certaines phases/de certains modules tels que définis à la *Figure 2.01* et de négliger les autres, cette décision doit également être correctement présentée.

- Elaboration du scénario du cycle de vie

Cette étape consiste à prendre connaissance des éléments à prendre en compte dans chacune des phases étudiées comme abordé ci-dessus.

- Quantification de l'immeuble et du cycle de vie

La quatrième étape est dans la continuité de la troisième. Maintenant que les besoins sont connus, il convient de décortiquer le bâtiment faisant l'objet de l'étude: réaliser un métré, déterminer les durées de vie des différents composants et le nombre de renouvellements de ceux-ci si la durée est inférieure à l'espérance de vie du bâtiment, évaluer les consommations en énergie et en eau de la phase d'exploitation,... Il faut également, sur base du but défini à la première étape, spécifier la qualité des données environnementales à récolter pour chacun des composants.

- Sélection des données environnementales

Pour une qualité optimale, les données environnementales doivent venir en priorité de fiches DEP mais si celles-ci ne sont pas disponibles ou incomplètes pour certains composants, l'information peut être collectée auprès d'autres sources dont la fiabilité est reconnue. L'information manquante peut également être mesurée par la personne réalisant l'ACV à condition de suivre les prescriptions relatives à la création d'une DEP détaillées dans l'EN 15804.

- Calculs des indicateurs environnementaux

Afin de décrire l'impact environnemental, la norme européenne prévoit le calcul de 7 indicateurs principaux. Ceux-ci sont repris, avec leur unités respectives à la *Table 2.02*. La norme prévoit additionnellement 15 autres indicateurs caractérisant l'utilisation des ressources, la production de déchets et les différents flux sortants de l'élément faisant l'objet de l'ACV. Selon le but de l'étude, tous les indicateurs ou juste une partie de ceux-ci

seront considérés dans l'ACV. Une fois les indicateurs choisis, leur calcul peut être réalisé et le bâtiment ainsi évalué.

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

Table 2.02 : Liste des indicateurs potentiels d'une ACV
(Sur base du tableau 2 de la norme EN 15978)

- Rapport et communication

Lorsque l'analyse est rendue publique, il est primordial d'accompagner les résultats trouvés d'un exposé de toutes les décisions qui ont été prises jusqu'à leur obtention. On doit ainsi fournir entre autres: le but, les phases et frontières sélectionnées, la période de validité, les sources et la preuve de la qualité des données utilisées, une justification des hypothèses considérées, la liste des indicateurs choisis ou encore la description détaillée du bâtiment et de ses systèmes.

- Vérification

Finalement, une étape de vérification des résultats peut être ajoutée. Elle consiste en la vérification du respect des normes, de la concordance entre le but et les phases et indicateurs choisis et du choix des données en entrée.

2.5.4. Base de données

L'analyse du cycle de vie prévue dans ce travail portera sur les modules A₁ à 3 et B₁ à 6 avec l'indicateur GWP. Afin de la mener à bien, l'impact en CO₂ des différents matériaux et composants mis en œuvre dans le cas d'étude et les scénarios doit être connu. Puisque l'étude ne se fait pas au travers d'un logiciel spécialisé comme Totem ou One click LCA mais via une implémentation et analyse personnelles réalisées à l'aide d'Excel, la source de ces informations n'est pas imposée et doit être choisie judicieusement. Deux types de sources sont utilisés habituellement en respect de la norme décrite ci-dessus:

les déclarations environnementales des produits mis en œuvre et des bases de données "plus générales". Ces deux types seront utilisés dans ce travail.

Deux choix principaux de bases de données sont possibles: ICE et Ecoinvent. Toutes les deux sont fréquemment utilisées dans la littérature. Bien que ces choix mènent à des résultats légèrement différents, les tendances exposées sont, elles, bien identiques (Takano et al., 2014). Puisqu'ici l'objectif est davantage de comparer différentes options que de les évaluer précisément, les deux choix sont alors tout aussi adaptés l'un que l'autre.

La base de données ICE a été publiée pour la première fois en 2005, créée à l'université de Bath (Royaume-Uni) par Geoffrey Hammond et Craig Jones (Hammond et Jones, 2011). Elle en est actuellement à sa version 3. Gratuite et libre d'accès, elle comprend les évaluations "*from cradle to gate*" de plus de 200 matériaux de construction (Jones, 2019). Pour chaque, elle reprend les émissions de gaz à effets de serre liées à leur production. Ces émissions sont exprimées en équivalent CO₂ au sens des normes européennes EN 15804 et EN 15978. Sa conception est basée sur des revues de littérature de pairs et sujette à de nombreuses vérifications. Bien que basée sur le contexte du Royaume-Uni, elle peut être appliquée plus largement (Hammond et Jones, 2008). Certains matériaux contiennent d'ailleurs différentes valeurs selon la région géographique. Elle est notamment téléchargeable sous forme d'un fichier Excel depuis le site web de Circular Ecology dont Craig Jones est un des directeurs (circular ecology, 2021).

La base de données Ecoinvent a été publiée pour la première fois (versions 1.01) en 2003. SimaPro (2021) en liste une série d'avantages :

- Base de données la plus utilisée et reconnue du marché
- Les données sont évaluées de façon très transparente et documentée
- Respecte les normes ISO 14040 et 14044
- Elle reprend plus d'éléments et d'indicateurs que la base de données ICE

De plus, elle porte sur un plus grand nombre de domaines. En effet, elle n'est pas focalisée sur la construction mais considère également des domaines comme l'agriculture et les transports (SimaPro, 2021). Elle est développée en Suisse sous la forme d'une association sans but lucratif. Elle consiste ainsi en une alternative continentale à la base de données ICE. Il est cependant nécessaire d'acheter une licence pour accéder à l'entièreté de ses données (Ecoinvent, 2021). La base de données ICE est elle en libre accès.

2.5.5. Monétisation

A l'issue d'une analyse du cycle de vie, une étape supplémentaire peut être menée. Celle-ci consiste en la conversion des impacts environnementaux mis en évidence en une valeur monétaire. Pour ce faire la méthode MMG (version 2017) développée par l'OVAM est appliquée dans ce travail. Celle-ci associe, à chaque indicateur de l'ACV, un coût unitaire (OVAM, 2018).

Trois méthodes de calcul sont utilisées dans la méthodologie MMG pour définir ces coûts unitaires. La première est de les calculer sur base des dommages causés par l'indicateur considéré. C'est la méthode "Damage cost". Les dommages considérés portent sur la société. On y retrouve, notamment, en reprenant les exemples donnés par l'OVAM, les pertes économiques dues à un impact sur la production agricole ou encore la baisse de l'espérance de vie humaine. Les différentes conséquences sont issues d'une étude approfondie des marchés et sur les données de la littérature. Les coûts des dommages sont des coûts sociaux qui incombent à la société (OVAM, 2018). La deuxième méthode est la méthode "Prevention Cost". Celle-ci se base sur les objectifs de réduction des émissions fixés par les autorités en charge et sur des études de coûts optimaux. Les coûts de prévention sont également des coûts sociaux. (OVAM, 2018). Finalement, la troisième méthode consiste à utiliser aussi bien les coûts des dommages que les coûts de prévention pour calculer le coût unitaire de l'indicateur.

À titre d'exemple, l'indicateur considéré dans ce travail (GWP) présente un coût unitaire de 0,05€/kg_{CO2}. Celui-ci a été déterminé à l'aide de la deuxième méthode: "Prévention Cost".

La réalisation d'une telle étape de monétisation a comme premier intérêt de permettre d'agréger en un seul score (une valeur monétaire) les résultats de tous les indicateurs considérés dans une ACV. Sans elle, chaque indicateur ayant une unité propre, comparer les résultats de différentes études serait très complexe et ne permettrait pas de désigner une plus performante. Un autre avantage de cette étape est tout simplement qu'elle permet de déterminer les coûts environnementaux représentés par les bâtiments. Pour rappel ces coûts doivent être pris en compte dans les analyses du coût du cycle de vie qui suivent la norme EN 15459. Le coût total représenté par le bâtiment est ainsi déterminé. Il couvre tous les frais qui devront être payés par le gestionnaire de l'infrastructure durant le cycle de vie du lieu en plus de couvrir les frais qui incomberont à la société à cause des dommages environnementaux qu'il induit. Ce coût total permet de comparer différents bâtiments ou option constructive de ce bâtiment à l'aide de données plus complètes. Les décisions qui en découlent seront donc plus pertinentes.

3. Méthodologie générale

Dans cette section, la méthodologie qui est suivie dans ce mémoire est présentée. La traduction des questions de recherche en une approche pour la réalisation de l'étude est tout d'abord abordée. Les variables et indicateurs utilisés dans l'approche ainsi définie sont ensuite explicités. Finalement le déroulement général du travail est décrit. Pour celui-ci, un plan schématique est présenté, les programmes et logiciels utilisés sont cités et la méthodologie des sections générales du travail est expliquée.

3.1. Approche de la problématique et questions de recherche

Ce travail se place dans la continuité de l'étude de large ampleur de Step2Sport (2017) et du guide wallon de conception énergétique des halls sportifs (2011) avec pour but de les compléter en vue de répondre aux faiblesses principales identifiées dans l'état de l'art. Afin de répondre aux trois questions exprimées dans celui-ci, il va être utilisée une approche par scénario.

Le but est donc ici de **comparer** différents scénarios de construction d'un hall sportif destiné à l'athlétisme d'un point de vue **écologique et économique** et de déterminer quelles options sont les plus adéquates pour ce type d'établissement. Il est décidé de limiter ces options à un **investissement initial supplémentaire de 15%**. De plus, il est choisi de prendre le point de vue d'une personne / collectivité qui serait susceptible d'avoir ce type de projet de construction. Ceci aura une influence notamment sur l'indicateur choisi pour caractériser l'impact environnemental ou encore sur les éléments pris en compte dans l'étude de coût. Pour citer un exemple, les coûts qui incombent à d'autres personnes ne seront ainsi pas pris en compte dans l'analyse du coût du cycle de vie. Les scénarios testés seront constitués de différentes stratégies écologiques recommandées par des études antérieures pour ce type de bâtiment. Ils seront évalués à l'aide d'une étude complète des coûts et de l'impact environnemental qu'ils induisent et sur le confort des usagers. C'est sur base des gains créés dans ces trois domaines (Environnement - coûts - confort) que les scénarios seront classés du plus au moins intéressant.

Afin de correspondre à l'approche de l'étude par scénario, la première question de recherche est adaptée. Les trois questions étudiées sont donc:

- *Quels sont les scénarios les plus avantageux à mettre en œuvre dans un hall sportif à budget restreint en Belgique et quels gains permettent-ils?*
- *Investir dans les systèmes est-il plus rentable, économiquement et écologiquement, qu'investir dans les parois? Est-ce l'inverse? Ou est ce qu'un équilibre entre les deux est nécessaire?*
- *L'utilisation de matériaux bio-sourcés dans un hall sportif est-elle intéressante d'un point de vue économique et environnemental et pour le confort des usagers?*

3.2. Variables et indicateurs

Les différentes variables dépendantes sur base desquelles sont évalués les scénarios et leur indicateur respectif sont présentés à la *Table 3.01*.

Objectifs	Variables	Bases normatives	Indicateurs
Valider la pertinence des scénarios vis-à-vis des objectifs et hypothèses du travail	Coût d'investissement	EN 15459	Euros (€)
	Confort	PEB*	Surchauffe (Kh)
Comparer les avantages et inconvénients des différents scénarios	Coût du cycle de vie	EN 15459	Euros sur 50 ans (€)
	Coût environnemental du réchauffement climatique	EN 15978	Monétisation des Kg de CO _{2e} émis sur 50 ans (€)

Table 3.01 : Liste des variables dépendantes étudiées dans ce travail
(* méthode adaptée à un bâtiment PEN)

Afin de créer les scénarios, les variables du cas d'étude qui seront modifiées sont relatives aux compositions des parois et aux types et caractéristiques des systèmes employés.

3.3. Organisation du travail

3.3.1. Plan du travail

La Figure 3.01 schématise le plan de travail suivi dans ce mémoire.

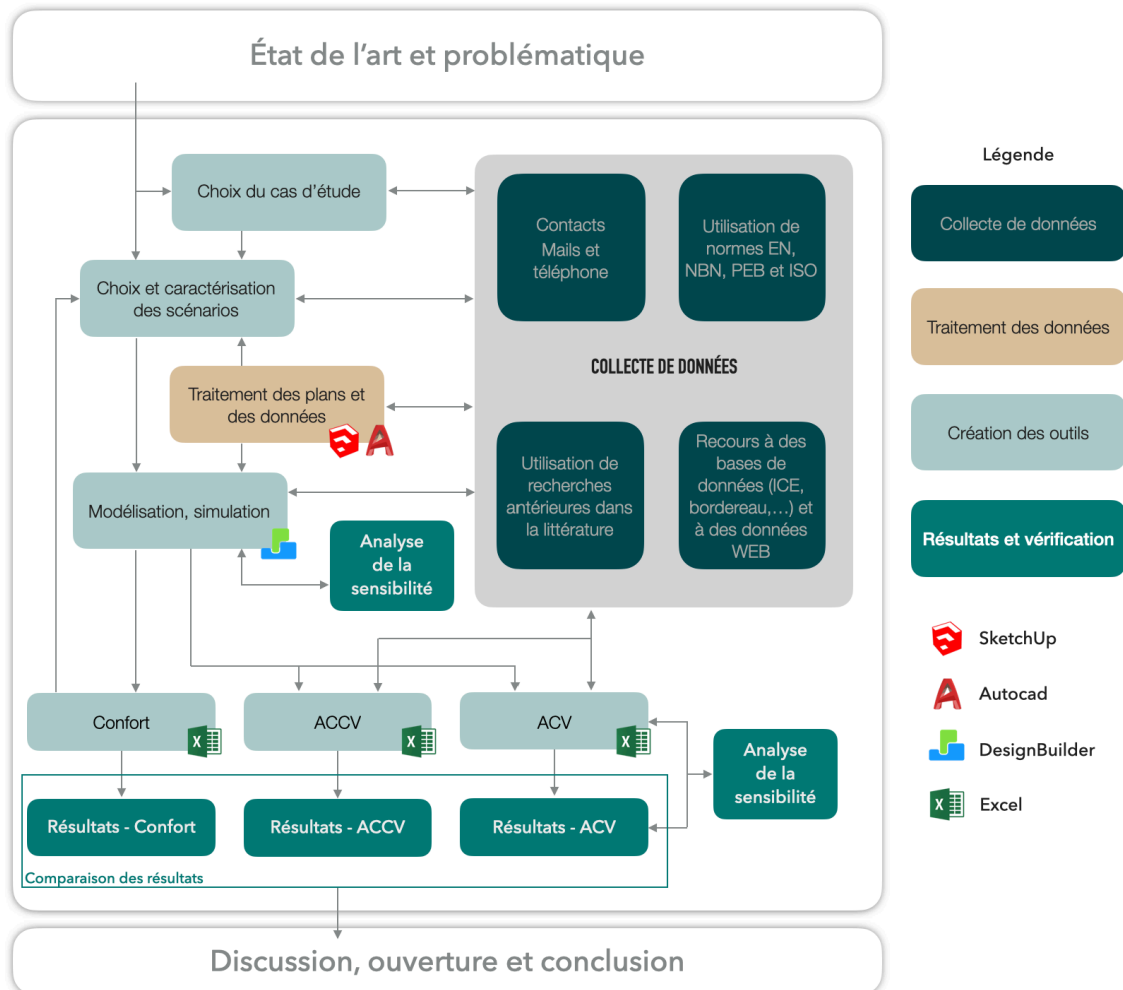


Figure 3.01 : Plan de travail

Ce travail commence par une revue de la littérature afin de déterminer ce qui a déjà été publié sur le sujet et ce qu'il serait intéressant d'étudier pour compléter l'état des connaissances sur celui-ci. Cette revue est suivie par le choix des questions de recherche et de la problématique qui sera analysée. Cette phase a été réalisée à la section précédente.

La suite recourt à plusieurs procédés itératifs. Elle permet la réalisation d'une étude du confort, du coût du cycle de vie et de l'impact environnemental pour chaque scénario étudié. Pour ce faire, elle commence par le choix du bâtiment qui servira de cas d'étude et par la récolte de données physiques et thermiques (plans, PEB,...) le concernant. Sur base de celles-ci et des informations récoltées dans la littérature, une première liste de

scénarios est dressée et une nouvelle collecte de données techniques est lancée afin de les caractériser. S'ensuit un premier procédé itératif faisant varier la liste et les caractéristiques des scénarios selon les données qui ont pu être récoltées. En parallèle, le comportement thermique du cas d'étude existant est modélisé et simulé sur DesignBuilder (EnergiePlus). La qualité de cette modélisation est évaluée via une étude des incertitudes et de la sensibilité.

Une fois la liste des scénarios stabilisée et le paramétrage de la modélisation du bâtiment existant validé, le comportement thermique des différents scénarios est simulé. Selon l'analyse de leur résultat de confort, les scénarios non conformes aux minima demandés dans le travail sont modifiés selon un nouveau processus itératif. Finalement, lorsque toutes les simulations sont validées, les données ainsi obtenues sont exploitées pour réaliser l'étude économique et l'étude environnementale (ACCV et ACV). Afin de mener à bien ces deux dernières étapes, de nombreuses nouvelles données relatives notamment aux coûts des matériaux et à leur impact sur le réchauffement climatique sont collectées via divers processus dont des prises de contact avec des professionnels du secteur. Enfin, les résultats obtenus à l'issue des études économique, environnementales et du confort pour les différents scénarios sont comparés.

La méthodologie générale suivie dans la deuxième phase de ce travail (de l'état de l'art à la discussion) peut être divisée en cinq volets plus ou moins longs: la mise en place de l'étude, la modélisation énergétique dans DesignBuilder, l'étude du confort, l'analyse économique et l'analyse environnementale. Les méthodologies de chacun de ces volets sont présentées dans la suite de cette section de manière aussi générale que possible. Elles seront ensuite détaillées et mises en œuvre dans les sections suivantes.

Une phase de discussion des résultats et de conclusion basée sur les données obtenues après la comparaison des résultats des scénarios clôture le travail.

3.3.2. Programmes utilisés

Afin de réaliser les études, différents programmes ont été utilisés. Ceux-ci ont été choisis pour leur adéquation avec les objectifs du travail, leur fiabilité et facilité d'utilisation et surtout pour la qualité des résultats qu'ils permettent d'obtenir. Ainsi les principaux sont: EnergiePlus - DesignBuilder (version 6) pour la modélisation et la simulation énergétique, SketchUp (2017) et Autocad (2019) pour le traitement des plans et Microsoft Excel (version 16.16.27) pour les études économiques et écologiques.

3.4. Déroulement de l'étude

3.4.1. Collecte de données

La collecte des données est une étape primordiale au bon déroulement de l'étude. Pour ce travail, elle a pris différentes formes.

Pour choisir et caractériser le cas d'étude, la priorité a été placée sur la recherche de données fiables et précises sur deux salles d'athlétisme indoor construites récemment (maximum 5 ans). Ce sont les salles de Mons (MOHA - 2016) et de Hannut (FCHA - 2019) qui ont été jugées les plus adaptées à l'étude³. Ce sont donc sur elles que les recherches se concentrent. La volonté était d'obtenir les plans d'architecture et des techniques spéciales, le rapport PEB et si possible, des factures ou relevés retraçant l'utilisation d'énergie dans le bâtiment. Sur base des documents obtenus, une des deux salles serait sélectionnée et l'autre servirait comme complément d'information en vue de valider certains choix.

Pour la salle de Mons, les demandes ont été adressées au président du club et à l'architecte du bâtiment. Un grand nombre de documents ont pu être récoltés: plans, vues, métrés et notes explicatives sur le système de chauffage et le niveau K du bâtiment. Cependant, le rapport PEB était peu utile car il date des normes précédentes bien moins contraignantes et est fort lacunaire. De plus, aucun relevé n'a pu être obtenu. Pour la salle de Hannut, les demandes ont été adressées à l'architecte du projet et au gestionnaire des infrastructures communales de Hannut avec pour résultat l'obtention des plans, coupes, façades et rapport PEB. Aucun relevé de compteurs ou factures n'a cependant pu être obtenu au vu de l'ancienneté trop faible du bâtiment.

D'autres informations ont également été obtenues en prenant contact avec des entreprises: pour les caractéristiques écologique et économique du revêtement de sol (Lesuco et Mondo), pour l'éclairage Led (Magnus) ainsi que pour les coûts d'une installation photovoltaïque (Coretec).

La majorité des données restantes ont été collectées directement dans la littérature, au sein des notes de cours du cursus ingénieur architecte à l'Université de Liège ou encore sur divers sites Internet fiables. Davantage d'informations sur les collectes de données réalisées spécifiquement pour les analyses de cycle de vie sont données aux *Sections 5. Méthodologie pour l'analyse du coût du cycle de vie* et *6. Méthodologie pour l'analyse du cycle de vie*.

³ Ce choix sera justifié plus en détail à la Section 7. Présentation du cas d'étude.

3.4.2.Choix du cas d'étude

Sur base des données récoltées sur les deux bâtiments et sur base de l'étude de celles-ci et de considérations d'ancienneté et d'adaptabilité notamment, le bâtiment "cas d'étude" sera sélectionné. La priorité sera accordée à un bâtiment récent, respectant les normes actuelles et avec des données détaillant toutes ses caractéristiques principales (structure, matériaux, systèmes,...). Il doit être représentatif de ce qui se construit actuellement dans ce domaine. Le choix sera réalisé et justifié dans la *Section 7. Présentation du cas d'étude*.

3.4.3.Création des scénarios

Afin d'étudier des scénarios pertinents vis-à-vis des objectifs de ce travail, ils seront définis en deux temps. Tout d'abord, sur base des informations collectées dans la littérature et des caractéristiques du cas d'étude, une liste de mesures à visée environnementale pertinentes à être appliquées à celui-ci sera dressée. Celle-ci pourra comprendre des mesures comme l'ajout d'une installation photovoltaïque ou encore l'utilisation d'isolants bio-sourcés.

Ces mesures seront ensuite combinées de sorte à former les scénarios qui seront testés dans l'étude. Afin d'être adaptés aux objectifs de l'étude, ceux-ci devront respecter deux critères pour être considérés valides. Le coût d'investissement supplémentaire qu'ils représentent par rapport au cas d'étude doit valoir maximum 15% du coût de celui-ci. Et la valeur de leur indicateur de surchauffe doit être inférieur à la limite de 1000 Kh⁴.

3.4.4.Modélisation et simulation à l'aide de DesignBuilder (EnergiePlus)

Il est attendu que les consommations énergétiques auront un impact non négligeable sur les études économiques et écologiques. Il est donc primordial d'assurer au maximum la qualité des opérations réalisées pour les déterminer. Pour ce travail, Il a été choisi de modéliser le bâtiment et d'en simuler les besoins énergétiques et la qualité de confort à l'aide de DesignBuilder, une interface utilisant le programme de simulation dynamique EnergiePlus. Ce type de programme propose effectivement des résultats plus fidèles à la réalité qu'un logiciel statique, comme le logiciel PEB par exemple.

L'utilisation de DesignBuilder et la récupération des résultats se déroulera en deux temps. C'est tout d'abord le cas d'étude qui sera modélisé et son comportement thermique simulé. Les résultats obtenus permettront le développement des scénarios qui pourront alors, à leur tour, être modélisés et simulés à l'aide du programme. Pour ceux-ci, le fichier DesignBuilder (.dsb) comprenant la modélisation du cas d'étude est dupliqué autant de fois que le nombre de scénarios étudiés. Chacune des copies peut ainsi être modifiée selon les particularités des scénarios. Au travers des simulations, il est cherché

⁴ Cette valeur est issue de la réglementation PEB (PER). Son utilisation dans ce travail est explicitée à la Section 4. Méthodologie pour l'étude du confort

à récolter le détail des consommations et des températures intérieures et extérieures. Les valeurs horaires de celles-ci sont donc collectées et exportées sous forme d'un fichier Excel pour chaque cas.

Une analyse de la sensibilité et des incertitudes liées à la modélisation du cas d'étude est également réalisée. La méthodologie de celle-ci ainsi que le détail sur les processus de modélisation dans DesignBuilder sont présentés en détail à la *Section 8. Modélisation dans DesignBuilder (EnergiePlus)*.

3.4.5. Analyse économique, environnementale et du confort

Les données récoltées via les simulations énergétiques sont utilisées dans les trois analyses clés de ce travail. Celles-ci sont l'analyse économique (ACCV), l'analyse environnementale (ACV) et l'analyse du confort. Ce sont les résultats obtenus pour ces dernières qui permettront de répondre aux différentes questions de recherche. Les méthodologies propres à ces trois analyses font l'objet de leur section méthodologique respective. Elles correspondent aux *Sections 4. Méthodologie pour l'étude du confort*, *5. Méthodologie pour l'analyse du coût du cycle de vie* et *6. Méthodologie pour l'analyse du cycle de vie*. Un élément important à considérer est la volonté d'ignorer les impacts de la crise sanitaire (Covid-19). En effet, elle a eu des impacts importants sur de nombreux domaines et notamment sur les prix. Il n'est cependant pas possible, à l'heure actuelle, de savoir l'impact qu'elle aura sur le long terme. Sera-t-elle suivie d'un retour des prix à leur niveau antérieur? Va-t-elle inciter le monde politique à revoir les normes de ventilation des bâtiments pour assurer des taux de renouvellement plus importants? Au vu des doutes très importants sur le futur, il est choisi d'ignorer pour ce travail ce phénomène particulier. Ce choix sera particulièrement important pour l'étude économique où les paramètres économiques seront calculés sur base des valeurs antérieures à 2020.

La méthodologie générale de ce travail montre l'importance qui a été donnée à la collecte des données et à leur vérification. Elle permet également de comprendre l'ampleur des analyses mises en œuvre pour répondre le plus fidèlement possible aux questions de recherche.

4. Méthodologie pour l'étude du confort

Dans cette section, la méthodologie suivie pour réaliser les évaluations du confort du cas d'étude et des scénarios est décrite. La section passe tout d'abord en revue la norme PEB de la surchauffe dans le cas des bâtiments résidentiels. Ensuite cette méthode est adaptée pour être appliquée à une infrastructure sportive.

La surchauffe ne correspond pas à un critère PEB à considérer dans le cas d'un bâtiment non résidentiel (PEN). Cependant, des températures trop élevées ne permettent pas la pratique du sport dans des conditions optimales. Puisqu'il est cherché au travers de ce travail à suivre une approche confort-environnement-coût, une vérification de la surchauffe semble être une bonne approche pour caractériser ce premier point. La surchauffe dans la salle sera donc déterminée selon une méthode similaire à celle utilisée par la PEB mais adaptée à ce type d'établissement et aux données fournies par les simulations réalisées.

4.1. Calcul de la surchauffe dans la PEB (PER)

La PEB exprime la surchauffe en Kelvin heure (Kh). Pour un logement, l'indicateur de surchauffe est "égal aux gains de chaleur annuels normalisés excédentaires par rapport à la température [maximale de confort]" (Bruxelles environnement, 2020). L'unité PEB est considérée en surchauffe lorsque sa température dépasse 23°C. Il est exprimé en Kelvin*heure (Kh). Si l'indicateur est inférieur à 1000 Kh, le critère "surchauffe" est validé mais s'il est supérieur à 6500 Kh il est rejeté. Entre les deux, une pénalité est appliquée au bâtiment⁵. L'avantage de la technique est de ne pas simplement compter le nombre d'heures au dessus de la température maximale mais de prendre en compte également de combien elle l'est; à quel point elle est source d'inconfort. Ainsi, par rapport à la température maximale de 23°C, rencontrer une heure durant laquelle la température est de 23,5°C sera moins pénalisant pour l'indicateur de surchauffe qu'une heure dont la température vaut 28°C.

4.2. Adaptation du calcul au cas d'un hall sportif

La méthode de la PEB présentée ci-dessus, n'est pas particulièrement adaptée à être appliquée à un hall sportif. Une série d'adaptations et d'hypothèses sont ainsi adoptées pour calculer de façon pertinente la surchauffe rencontrée:

- La température de confort pour une salle de sport est évaluée à 17°C ⁶. Elle est donc inférieure à celle prévue dans une habitation (généralement entre 18°C et 20°C selon les pièces). Considérer la même limite pour la surchauffe que celle d'application dans les

⁵ La pénalité consiste en l'ajout d'une consommation électrique fictive. Pour plus de détails, voir (Bruxelles environnement, 2020). Cette pénalité ne sera pas utilisée dans ce travail où tous les scénarios étudiés devront être optimaux (<1000 Kh) et ne sera donc pas développée plus en détail.

⁶ Cette valeur est issue du guide wallon de conception énergétique des halls sportifs (Matriciel, 2011).

habitations (23°C) serait donc illogique puisque cela amènerait à considérer qu'une augmentation de 6° de la température de la salle n'amènerait pas d'inconfort excessif. La valeur limite de la surchauffe est donc adaptée pour ce cas. Il est choisi de la fixer 4°C plus haut que la température de confort, de façon similaire à ce qui est observé pour les logements (passant de ~19°C à 23°C). La surchauffe commencera donc à 21°C ici.

- Pour un logement, une surchauffe en soirée ou la nuit est problématique vu l'utilisation de ce type de biens. Au contraire, un hall sportif étant occupé uniquement à certaines heures de la journée, considérer la surchauffe de celui-ci en dehors de ces heures est inopportun. Seules les heures de surchauffe comprises durant les heures d'occupation de la salle seront donc considérées. Le planning d'occupation sera celui défini à la *Section 8. Modélisation dans DesignBuilder (EnergiePlus)*.
- Puisque l'athlétisme peut également se pratiquer en extérieur, l'hypothèse suivante est également prise: les entraînements peuvent se dérouler exclusivement en extérieur lorsque la température y est de plus de 17°C et que la météo le permet (pas de pluie). Les heures calculées comme étant sujettes à surchauffe mais durant lesquelles cette hypothèse est respectée seront donc ignorées.

Ainsi l'indicateur de surchauffe qui sera déterminé pour chacun des cas correspondra, ici, à la somme des dépassements horaires de la température maximale (21°C) occurant durant les heures d'occupation de la salle et si la météo extérieure ne permet pas un report des activités sur la piste en plein air durant ces heures. Le définir ainsi permet, de plus, de considérer le point de vue d'un gestionnaire de ce type d'infrastructure qui chercherait à savoir si la qualité des entraînements peut être assurée en rentabilisant l'utilisation aussi bien de son hall indoor que de sa piste outdoor. L'indicateur est exprimé en Kh et porte sur une année. Les calculs seront effectués sur Excel sur base des relevés horaires des températures et de la météo obtenus lors des simulations dans DesignBuilder.

4.3. Utilisation de l'indicateur de surchauffe

Grâce à sa valeur qui permet d'évaluer le confort de la salle, il est utilisé comme une des méthodes de validation du choix des différents scénarios. Pour ce faire, le barème de la PEB est réutilisé. Tous les scénarios affichant une quantité de Kh inférieure à 1.000 sont considérés adaptés.

Si le cas de base était évalué comme non-adapté, une attention particulière devrait être menée pour associer une dimension refroidissement à l'écologie et à l'économie considérées jusqu'ici. Si celui-ci est déjà considéré correct par l'étude de surchauffe, les scénarios seront jugés d'autant plus valides s'ils parviennent à encore améliorer la situation ou, au minimum, parviennent à se positionner à un niveau proche de la valeur de la situation existante du cas d'étude.

La méthode utilisée pour le calcul de la surchauffe est ainsi basée sur une norme reconnue mais modifiée pour être adaptée aux bâtiments sportifs. Elle permet une évaluation du confort pertinente mais sujette à la réalisation d'hypothèses.

5. Méthodologie pour l'analyse du coût du cycle de vie

Dans cette section, la méthodologie suivie pour réaliser les analyses du coût du cycle de vie du cas d'étude et des scénarios est décrite. Elle commence par rappeler la norme suivie puis en cite les formules principales mises en œuvre ici. Elle se finit par la détermination des paramètres économiques nécessaires et pas la pose d'une série d'hypothèses nécessaires au déroulement de cette ACCV.

5.1. Norme et définition des limites

L'analyse du coût du cycle de vie est réalisée en suivant la norme EN 15459 en application depuis 2017 telle qu'elle a été présentée dans l'état de l'art. L'objectif est de définir le coût global que représente l'infrastructure. Pour rappel, celui-ci est défini comme étant le montant qu'il est nécessaire de posséder aujourd'hui (T_0) afin de pouvoir financer l'entièreté des dépenses et investissements que demandera le bâtiment durant son cycle de vie.

La volonté est d'étudier le point de vue d'un investisseur envisageant la création d'une infrastructure de ce type. C'est pour cette raison, entre autres, que ne seront pas pris en compte pour l'étude économique des scénarios les coûts environnementaux ainsi que les coûts de fin de vie du bâtiment. Les premiers coûts sont déjà pris en compte dans l'étude écologique et représentent un coût "fictif" puisque relatif à la collectivité. Ce coût social ne devra en effet pas être réellement payé. Les coûts de fin de vie ne sont, eux, pas pris en compte car ils incombent "aux propriétaires suivants" (Allacker, 2010) et non à l'investisseur initial. De plus, les données disponibles concernant la démolition et le traitement des déchets de ce type de construction sont bien trop peu nombreuses que pour pouvoir assurer la fiabilité nécessaire à ce travail. Les coûts de fin de vie seront cependant évalués à titre indicatif pour le cas de base, moins gourmand en techniques particulières et permettant donc une analyse plus fiable, à des fins de complétude et afin d'offrir la possibilité de comparer les coûts des autres étapes au coût total ainsi défini. De plus, cette évaluation pourrait également servir de base de comparaison pour de futurs travaux.

5.2. Données utilisées

5.2.1. Collecte de données pour l'ACCV

Les données utilisées pour définir les coûts des différents matériaux et produits mis en œuvre sont issues de différentes sources.

La source de base est le bordereau des prix unitaires publié en 2020 par l'UPA (Union Professionnelle d'Architectes) (UPA, 2020). Celui-ci reprend les prix des éléments usuels utilisés couramment dans le résidentiel. Puisque le cas d'étude considéré ici est

d'une complexité limitée, le recours à ce bordereau est adapté. Il permet l'utilisation de données de qualité mises à jour régulièrement et qui sont représentatives du contexte belge. Pour les éléments et produits mis en œuvre mais n'étant pas repris dans ce document comme, par exemple, les panneaux sandwich des parois ou encore la centrale de ventilation capable de pulser 5000m³/h, les informations sont récoltées auprès d'autres sources: les sites des fabricants, des sites spécialisés ou via des contacts par mail.

Le bordereau et les principales autres sources ne prennent pas en compte les frais de main d'œuvre relatifs au processus de construction et d'installation des systèmes. Ceux-ci seront alors calculés sur base du coût horaire de la main d'œuvre⁷ multiplié par le nombre d'heures nécessaires. Ce nombre d'heures est estimé sur base des temps unitaires usuels en construction⁸.

Tous les matériaux et produits mis en œuvre n'ont pas forcément la même durée de vie que le bâtiment. Une grande partie d'entre eux devront être remplacés durant la durée de l'analyse. Les durées de vie de chacun de ceux-ci doivent donc être déterminées. Elles sont récoltées en priorité à partir de la norme européenne EN 15459 et complétées si besoin sur base du guide "Durée de vie conventionnelle des biens" publié par Sypemi (2018) ou via des contacts par mail. Les différentes durées de vie des éléments principaux sont reprises à l'*Annexe 3*⁹.

5.2.2. Traitement des données

Afin d'utiliser les valeurs trouvées dans ces sources, un métré du cas d'étude a été réalisé. Celui-ci exprime la quantité de chacun des éléments mis en œuvre dans la même unité que celle de la source de prix. Par exemple, les éléments en béton sont répertoriés en m³, les panneaux sandwich en m², les appareils techniques à l'unité, les châssis en mètres courants ou encore les poutres métalliques en kg¹⁰. Selon les sources utilisées, les prix sont parfois désignés par un intervalle minimum-maximum et non simplement par une seule valeur. Dans de tels cas, la valeur milieu de l'intervalle est considérée.

⁷ Évaluée à 31,5 €/h HTVA dans le bordereau (UPA, 2020)

⁸ Les temps unitaires sont des facteurs propres à chaque type de matériaux et type de pose qui lient une quantité unitaire de ce matériau exprimée en m³, m² ou à la pièce au nombre d'heures de travail à prévoir. Conçus pour la réalisation de planning de travaux, ils sont surévalués pour compenser les retards éventuels. Pour les utiliser pour une étude de coût ils sont donc multipliés par 0,75 comme recommandé par Polyvert (2021).

⁹ Pour davantage de détails, le fichier Excel est disponible en document annexe

¹⁰ La masse est déterminée en multipliant la section de la poutre par sa longueur et par la masse volumique de l'acier.

5.3. Éléments de calcul

La norme européenne EN 15459 fournit la *Formule 5.01* pour déterminer le coût global d'un bâtiment sur une période considérée.

$$CG = CI_i + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{50} \left(\frac{CA_i(j)(1 + R_{a(i)}(j)) + CE_i(j)(1 + R_{e(i)})}{(1 + R_d(i))} \right) - VR_F(j) + CD_F(j) \right] [\text{€}]$$

où

CG	est le coût global actualisé (rapporté à la première année T_0)
CI_i	est le coût d'investissement initial
$CA_i(j)$	est le coût annuel pour l'année i du composant ou du service j
$CE_i(j)$	est le coût environnemental pour l'année i
$R_{a(i)}(j)$	est le taux d'évolution des prix lors de l'année i pour le composant ou le service j
$R_{e(i)}$	est le taux d'évolution des coûts environnementaux lors de l'année i
R_d	est le taux d'escompte
$VR_F(j)$	est la valeur résiduelle finale du composant ou service j
$CD_F(j)$	est le coût de démantèlement du composant ou service j

Formule 5.01 : Coût global actualisé

Dans ce travail les coûts environnementaux et de démantèlement ne sont pas pris en compte dans l'ACCV. L'équation peut donc être simplifiée et réécrite. La version qui sera finalement utilisée dans ce tfe est reprise à la *Formule 5.02*.

$$CG = CI_i + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{50} \left(\frac{CA_i(j)(1 + R_a(j))^i}{(1 + R_d)^i} \right) - VR_F(j) \right] [\text{€}]$$

Formule 5.02 : Coût global actualisé - formule simplifiée pour ce travail

Dans les *Formules 5.01 et 5.02*, présentées ci-dessus, une série de paramètres économiques sont utilisés. Parmi ceux-ci, on retrouve notamment les taux d'évolution annuels des prix et le taux d'escompte. Ces taux permettent d'actualiser les coûts. Il est ainsi possible de déterminer l'argent que l'on doit posséder aujourd'hui afin d'avoir les fonds nécessaires pour financer un chantier dans dix ans. La *Formule 5.03* offre un zoom sur cette actualisation. Au numérateur, le coût actuel (T_0) d'un composant est multiplié par l'inflation attendue entre cette année T_0 et l'année cible (T_F). Il représente donc le prix du composant durant l'année T_F . Ce prix est ensuite divisé par le taux d'escompte entre l'année T_0 et l'année T_F . Le résultat de cette division donne la somme (en euro) qu'il est nécessaire d'avoir aujourd'hui pour pouvoir investir dans le composant désiré durant l'année T_F .

$$\frac{C_{T_0}(1 + R_a)^{T_F}}{(1 + R_d)^{T_F}} \quad [€]$$

Formule 5.03 : Zoom sur l'actualisation d'un coût

La *Formule 5.03* servant à prendre en compte cette actualisation de la valeur de l'argent est régulièrement simplifiée en utilisant un taux d'escompte réel et non plus nominal. Le taux d'escompte réel décompte directement l'impact de l'inflation du taux nominal, ce qui donne une expression allégée d'un facteur (Allacker, 2010). Néanmoins dans le cadre de ce travail, il a été décidé de ne pas se limiter à considérer l'inflation pour décrire l'évolution des prix des matériaux ou encore de l'énergie. En effet comme noté par Allacker (2010), les taux d'évolution de ces prix ne suivent pas strictement l'inflation. Trois taux d'évolution sont donc ici choisis pour décrire l'évolution temporelle: un pour les matériaux et la main d'œuvre et un différent pour chacune des deux énergies utilisées, comme recommandé dans la norme EN 15459. L'utilisation du taux d'escompte nominal est donc conservée.

5.4. Paramètres économiques pour l'actualisation des coûts

Il est évident que les différents paramètres économiques vont impacter fortement les résultats des études de coûts. Il est donc primordial de les définir avec soin afin de ne pas fausser les conclusions qu'on en tirera. Ainsi conformément à l'usage statistique en cas d'évolution temporelle d'une variable, les taux sont pris égaux à la moyenne géométrique des taux d'évolution annuels observés sur les dix dernières années, en règle générale, et récoltés auprès de sources fiables, actuelles et belges.

Il est précisé "en règle générale" pour la période de 10 ans car, comme abordé précédemment, il est souhaité dans ce travail de faire abstraction de la crise de la Covid-19 puisqu'il n'est pas possible aujourd'hui de savoir exactement les effets économiques et sociaux que celle-ci amènera à moyen et long terme. Or calculer des taux d'évolution moyens en prenant en compte les valeurs de 2020 pourra, pour certains domaines les plus touchés, comme l'énergie, fausser de façon excessive ces taux. Pour cette raison, les calculs ont été réalisés deux fois: une fois en tenant compte de la valeur observée en 2020 et une fois sans celle-ci. En cas de différence marquée entre les deux taux trouvés, la variante estimée sans 2020 est conservée.

A noter qu'un taux moyen, comme une moyenne en toute généralité, n'est qu'un résumé statistique dont la précision varie en fonction de la variabilité des données initiales. Il est, cependant, intéressant de rappeler à nouveau que ce travail se focalise sur une comparaison de scénarios évalués selon les mêmes stratégies. Utiliser une telle moyenne pour chaque scénario permet d'atteindre cet objectif de comparaison.

5.4.1. Pour l'inflation:

Pour l'inflation, les valeurs annuelles sont issues de l'annexe statistique réalisée par le bureau du Plan dans le cadre de leur étude du budget économique 2021. Les valeurs annuelles pour les années 2015 à 2020 y sont présentées mais l'impact de la crise sanitaire est non négligeable sur la valeur 2020. Il est donc décidé de baser la moyenne géométrique sur les valeurs annuelles de la période 2015-2019 uniquement. Ces valeurs sont reprises à la *Table 5.01* (Plan, 2021)¹¹.

Inflation	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Évolution annuelle	100,6	102,0	102,1	102,1	101,4	100,7	101,6

Table 5.01 : Évolution annuelle de l'inflation
(Sur base des données du PLAN (2021))

5.4.2. Pour les matériaux et la main d'œuvre:

Pour les matériaux et la main d'œuvre, il a été choisi de se baser sur l'indice ABEX. Celui-ci a déjà été utilisé dans des études de coût notamment par Allacker (2010).

L'indice ABEX est établi deux fois par an par une commission d'experts au niveau belge. L'indice est représentatif du coût de construction de logements en prenant en compte aussi bien les matériaux que la main d'œuvre (ABEX, 2021). Bien que le cas d'étude servant à ce travail ne consiste pas en des logements, l'utilisation de cet indice se justifie au vu de l'utilisation du bordereau des prix utilisés qui indique lui aussi des prix pour l'habitat. L'utilisation de ce bordereau a été justifiée au *Point 5.2.1* par la faible complexité des travaux, et par le fait qu'il s'agit d'une source très fiable, à jour et spécifiquement destinée au marché belge. Les mêmes justifications sont également valables directement pour l'indice ABEX.

Le taux d'évolution annuel moyen du coût des matériaux et de la main d'œuvre considéré pour ce travail est donc la moyenne géométrique des taux d'évolution annuels de l'indice Abex sur les dix dernières années. Dans le cas de l'indice ABEX, aucun impact notable de la crise sanitaire n'est relevable dans l'évolution annuelle de 2020, comme visible à la *Table 5.02*. Cette valeur est donc conservée et le taux est bien calculé sur base des valeurs 2010-2020.

L'évolution des prix des matériaux et de la main d'œuvre est donc évaluée à + 2,3% annuellement, soit 0,7% de plus que le taux d'inflation théorique (calculé au *Point 5.4.1*). Ceci justifie bien l'intérêt de ne pas se limiter à cette valeur non spécifique à notre domaine.

¹¹ Le taux d'escompte moyen aurait été de + 1,5% en choisissant la moyenne de la période 2015-2020.

ABEX	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Mean
Moyenne annuelle	681,5	699,5	720	734,5	744,5	744	752	771	799	826	852,5	
Évolution annuelle	NA	102,6	102,9	102	101,4	99,9	101,1	102,5	103,6	103,4	103,2	102,3

Table 5.02 : Évolution annuelle de l'indice ABEX
(Sur base des données de l'ABEX (2021))

5.4.3. Pour l'électricité:

Les prix moyens TVAC par kWh sont répertoriés chaque mois par l'APERe (association indépendante reconnue par les autorités publiques) dans leur observatoire des prix de l'énergie. Une moyenne arithmétique de ces prix a été réalisée afin d'obtenir un prix moyen par kWh pour chaque année de 2010 à 2020. Voir *Table 5.03*. (APERe, 2021).

Cependant, le prix de l'électricité a été fortement impacté par la crise sanitaire de 2020: moins de consommation de la part des entreprises et industries entraînant une chute des prix (Horel, 2020). Afin de ne pas fausser le taux qui sera projeté sur une période de 50 ans à cause de cet évènement exceptionnel, son évaluation ne se fera que sur neuf années de 2010 à 2019.¹²

Le calcul de la moyenne géométrique évalue l'évolution des prix à + 2,6% annuellement, soit 1% de plus que le taux d'inflation théorique.¹³

Élec.	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Mean
Moyenne annuelle (en c€)	22,7	24,8	24,6	23,7	21,7	22,6	24,2	25,5	26,7	28,6	25,8	
Evolution annuelle	NA	108,9	99,1	96,6	91,3	104,2	107,2	105,2	105	106,9	90,5	102,6

Table 5.03 : Évolution annuelle des prix de l'électricité
(Sur base des données de l'APERe (2021))

¹² La possibilité de conserver une évaluation sur 10 ans en choisissant la période 2009-2019 a été écartée afin de ne pas s'approcher davantage de la période de crise économique de 2008. Supprimer un évènement exceptionnel pour en ajouter un autre n'aurait pas de sens.

¹³ L'évolution aurait été de 1,3% en choisissant la moyenne de la période 2010-2020 et de 3,3% avec la période 2009-2019 montrant bien l'importance d'éviter les périodes exceptionnelles.

5.4.4. Pour le gaz:

Il est à nouveau possible de recourir aux données répertoriées par l'APERe (2021) dans leur observatoire des prix de l'énergie. L'observatoire fournit, pour chaque mois, les prix moyens TVAC par kWh¹⁴. Une moyenne arithmétique de ces prix a été réalisée afin d'obtenir un prix moyen par kWh pour chaque année de 2010 à 2020. Il est important de remarquer la forte variabilité existant dans les prix d'une année à l'autre rendant moins représentative l'estimation d'un taux d'évolution annuel moyen. Néanmoins, celui-ci doit être estimé avec les données disponibles, tout en notant que le prix du gaz a été fortement impacté par la crise sanitaire de 2020: moins de consommation de la part des entreprises et industries entraînant une chute des prix (Belga, 2020). Dès lors, l'évaluation du taux ne se fera que sur neuf années de 2010 à 2019 comme cela a été fait avec l'électricité.¹⁵ Au vu de la *Table 5.04*, conserver la valeur de 2019 pourrait étonner puisqu'elle représente tout comme 2020 une importante chute des prix. Mais comme celle-ci n'est pas due à un événement exceptionnel mais à un simple hasard météorologique (hiver doux) et financier (baisse du cours du pétrole et production accrue de gaz) (Selectra, 2021), la probabilité de voir réapparaître des baisses de ce type durant la durée de l'étude est grande et la négliger reviendrait à fausser les prévisions.

L'évolution des prix est donc évaluée à + 0,7% annuellement soit 0,9% de moins que le taux d'inflation théorique.¹⁶

Gaz	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Mean
Moyenne annuelle (en c€)	5,5	6,6	7,5	6,9	6,6	6,5	6	6,2	6,7	5,9	4,7	
Évolution annuelle	NA	120,4	112,9	92	95,3	99,4	91,3	103,8	108,6	87,4	80,5	100,7

Table 5.04 : Évolution annuelle des prix du gaz
(Sur base des données de l'APERe (2021))

5.4.5. Pour le taux d'escompte:

Le taux d'escompte nominal a été choisi égal au taux d'intérêt nominal à long terme (10 ans) conformément aux recommandations de différents travaux antérieurs comme celui d'Allacker (2010).

¹⁴ Le gaz étant habituellement comptabilisé et payé au mètre cube, l'APERe a converti les valeurs en kWh en utilisant le pouvoir calorifique supérieur du combustible (APERe, 2018).

¹⁵ La possibilité de conserver une évaluation sur 10 ans en choisissant la période 2009-2019 à été écartée afin de rester cohérent avec la décision prise pour l'électricité bien que dans le cas du gaz, l'évolution annuelle moyenne de 2009 à 2019 est identique à celle de 2010 à 2019.

¹⁶ L'évolution aurait été de -1,5% en choisissant la moyenne de la période 2010-2020 montrant bien à nouveau l'importance d'éviter les périodes exceptionnelles.

Le taux d'intérêt annuel moyen est déterminé comme pour l'inflation. Les valeurs annuelles sont issues de l'annexe statistique réalisée par le bureau du Plan dans le cadre de leur étude du budget économique 2021 (Plan, 2021). Les valeurs annuelles pour les années 2015 à 2020 y sont présentées mais tout comme pour les énergies, l'impact de la crise sanitaire est non négligeable sur la valeur 2020. Il est donc décidé de baser la moyenne géométrique sur les valeurs annuelles de la période 2015-2019 uniquement. ces valeurs sont reprises à la *Table 5.05*. Le taux d'escompte nominal moyen est donc évalué à + 0,6% annuellement.¹⁷

Intérêt	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Moyenne
Évolution annuelle	100,8	100,4	100,7	100,7	100,2	99,9	100,6

Table 5.05 : Évolution annuelle du taux d'intérêt nominal à long terme
(Sur base des données du bureau du Plan (2021))

Ainsi les différentes variations annuelles considérées sont résumées à la *Table 5.06* avec leur source et la période temporelle utilisée pour leur calcul.

Facteur (nominal)	source	Période de calcul	Valeur
Taux d'inflation	Bureau fédéral du Plan	5 ans (2015 - 2019)	1,6 %
Évolution des prix de la construction	ABEX	10 ans	2,3 %
Évolution des prix de l'électricité	observatoire prix	9 ans (2010 - 2019)	2,6 %
Évolution des prix du gaz	observatoire prix	9 ans (2010 - 2019)	0,7 %
Taux d'intérêt à long terme 10 ans (OLO)	Bureau fédéral du Plan	5 ans (2015 - 2019)	0,6 %

Table 5.06 : Tableau récapitulatif des paramètres économiques

5.5. Coûts de l'énergie

Les coûts de l'énergie, hors actualisation, sont pris égaux à ceux de l'année 2019, conformément à la volonté d'éviter l'impact de la Covid-19 sur les résultats. Ils sont donc de 5,9 c€/kWh pour le gaz et 28,3 c€/kWh pour l'électricité comme l'indique l'observatoire des prix de l'énergie de l'APERe (2021). Cependant, comme le rappelle le

¹⁷ Le taux d'escompte moyen aurait été de 0,4% en choisissant la moyenne de la période 2015-2020. De plus considérer une période de 10 ans comme pour les autres indicateurs n'était ici pas envisageable au vu du bouleversement très important existant entre les valeurs de la première moitié des années 2010 comparées à celles de la deuxième moitié.

CREG (2021), pour les clients professionnels, la part de la TVA peut être décomptée de ces prix puisqu'elle leur est récupérable. De plus, l'injection d'électricité¹⁸ en heure pleine sur le réseau sera valorisée à hauteur de 3,5 c€/kWh comme communiqué par Jamoye (2021).

Les valeurs relatives au coût de l'énergie sont résumées à la Table 5.07. Les tarifs du gaz naturel et du prélèvement d'électricité sont exprimés sans la part de TVA.

Énergie	Gaz naturel	Prélèvement d'électricité	Injection d'électricité
Tarif en c€/kWh	4,90	23,74	-3,5

Table 5.07 : Tableau récapitulatif des tarifs énergétiques

5.6.Hypothèses

Une hypothèse prise pour la réalisation de l'étude économique concerne la non prise en compte des subsides. La justification de cette hypothèse se base sur le fait que ceux-ci sont jugés trop volatils, trop ponctuels dans le temps. Les considérer diminuerait la fiabilité à moyen et long terme de ce travail. Cette hypothèse a de plus déjà été faite pour la création du guide wallon sur les halls sportifs. Dans celui-ci, les auteurs la justifient de la façon suivante: "Cette hypothèse nous permet d'assurer au guide une certaine pérennité [...] et indépendance de mouvement par rapport aux systèmes de primes et d'accentuer la motivation énergétique des projets par rapport à celle purement financière." (Matriciel, 2011).

Dans ce travail, il est supposé que le bâtiment soit construit en 2019 pour une ouverture le premier janvier 2020. Les 50 années de l'étude s'étendent donc du 1/1/2020 au 31/12/2069. Les coûts énergétiques et de maintenance sont supposés être payés en fin d'année tandis que les frais liés au remplacement et au démantèlement des éléments en fin de vie sont supposés réglés en début d'année. Par exemple: les frais liés à la consommation énergétique de l'année 2021 seront calculés sur base du coût de l'énergie au 31/12/2021 tandis qu'un élément ayant une durée de vie de 25 ans sera remplacé le 1 janvier de la 26e année.

Pour conclure cette méthodologie, il est intéressant de rappeler que, comme toute étude cherchant à caractériser un comportement futur, les résultats ne peuvent être plus justes que ce que les données et les connaissances actuelles ne permettent de prédire. La qualité des paramètres utilisés est donc primordiale pour assurer des résultats les plus fiables possibles. Cette section montre bien que la définition de ces paramètres a été faite sur des bases solides et que les résultats pourront donc être supposés proches de la réalité future.

¹⁸ Pour les scénarios qui mettent en œuvre une installation photovoltaïque, un bilan horaire consommation/production est réalisé sur toute l'année simulée. pour chaque heure sera donc déterminée la quantité d'électricité qu'il est nécessaire d'acheter pour couvrir les besoins ou la quantité d'électricité qui est injectée sur le réseau car dépassant la consommation nécessaire. La temporalité du solaire est ainsi bien prise en compte.

6. Méthodologie pour l'analyse du cycle de vie

Cette section présente les différents paramètres de l'analyse du cycle de vie. Comme abordé dans l'état de l'art, celle-ci est réalisée suivant les normes européennes EN 15804 (2019) et EN 15978 (2012). La section commence par expliciter et justifier les phases et indicateurs choisis pour la réalisation de l'ACV. Elles abordent ensuite les données utilisées, leurs sources et les hypothèses qui ont dû être réalisées. Finalement, les méthodologies des étapes finales de l'analyse, la monétisation des résultats et l'étude de sensibilité sont développées.

6.1. Choix des phases et de l'indicateur

Pour évaluer l'impact environnemental du bâtiment et des scénarios d'adaptation de celui-ci, il a été décidé de considérer les modules A_1 à A_3 et B_1 à B_6 et ce, selon l'indicateur "réchauffement climatique". Il est choisi d'étudier les modules B sur une durée de vie de 50 ans.

L'étude ne couvre pas l'entièreté du cycle de vie "from cradle to cradle" pour différentes raisons: les modules A_4 à A_5 , relatifs au transport des matériaux de l'usine au chantier et au processus de construction, sont difficilement estimables; le module B_7 n'a pas d'intérêt ici, le bâtiment considéré ne consommant pas d'eau (les sanitaires et vestiaires étant situés dans un bâtiment annexe non considéré ici) et les modules C et D, relatifs à la fin de vie et aux avantages extérieurs au cycle de vie, risqueraient d'amener des résultats trop éloignés de la réalité. En effet, pour ce dernier, au vu de la longue durée de vie considérée, il est à attendre que lorsque sera venu le temps de démanteler le bâtiment, davantage de possibilités de recyclage et réutilisation auront été mises au point par rapport à celles connues aujourd'hui. Par exemple, l'utilisation de plus en plus fréquente de panneaux sandwich fait que des filières de recyclage commencent à se développer pour ceux-ci. Il peut donc être supposé, sans trop d'incertitudes, que lorsque le bâtiment sera en fin de vie, celles-ci seront au point. Les modules A_1 à A_3 et B_1 à B_6 correspondent généralement aux modules les plus critiques et représentatifs d'une ACV.

6.2. Données utilisées

Deux types de sources sont majoritairement utilisés: des EPD (déclaration environnementale des produits) et la base de données ICE.

Cette dernière a été choisie, plutôt que Ecoinvent, pour trois raisons principales. Tout d'abord, elle est libre d'accès et téléchargeable en format Excel. Ceci la rend plus adaptée à être utilisée dans un tfe que Ecoinvent. Ensuite, elle est basée, tout comme ce travail, sur les normes européennes EN 15804 et EN 15978. Utiliser une base de données utilisant les mêmes références que celles des méthodes mises en œuvre permet d'assurer une pertinence optimale des valeurs utilisées. De plus, comme déjà cité à la

Section 2. État de l'art, elles sont toutes deux aussi pertinentes l'une que l'autre lorsque le but est de comparer différentes options. Même si Ecoinvent propose davantage de valeurs, ceci ne la rend pas plus adaptée à ce travail. En effet, seul l'indicateur GWP et des éléments de construction seront utilisés ici. Ceux-ci sont bien présents dans ICE. Ses avantages l'emportent donc sur ceux d'Ecoinvent. C'est donc celle-ci qui est sélectionnée pour ce travail.

Les EPD sont préférées à la base de données ICE, plus générale, pour quantifier l'impact des parois. Ceci s'explique par le besoin de précision particulièrement important pour celles-ci. Tout d'abord parce qu'elles représentent une part importante de l'impact écologique total du bâtiment mais également car elles sont un des éléments étudiés dans les scénarios. Pour les éléments restant identiques entre chaque scénario, les données ICE ont été jugées suffisantes. Elles sont issues de la version la plus récente du fichier, publiée en 2019.

Afin d'exploiter les valeurs de la base de données et des sources annexes, le métré réalisé pour l'ACCV a été réutilisé. Pour rappel, celui-ci exprime la quantité de chacun des éléments mis en œuvre dans l'unité permettant l'exploitation du facteur de conversion. Par exemple, les éléments en béton sont répertoriés en m³, les panneaux sandwich en m² ou encore les poutres métalliques en kg ¹⁹.

6.3. Émissions de gaz à effet de serre dues aux consommations énergétiques

Afin d'évaluer l'impact en CO₂e [équivalent CO₂]²⁰ des consommations énergétiques du bâtiment, des facteurs de conversion sont utilisés pour convertir les kWh consommés en quantité de CO₂e émis pour la production de ceux-ci. Deux facteurs distincts sont utilisés: un pour l'électricité et un autre pour le gaz naturel. Les facteurs sont proportionnels à la quantité d'énergies primaires qui ont été nécessaires à la production de l'énergie finale consommée (Energieplus, 2007a).

6.3.1. Facteurs de conversion pour l'électricité

Pour l'électricité, le facteur de conversion varie d'un pays à l'autre selon le mix énergétique observé dans le pays. En Belgique, grâce à la grande part du nucléaire, l'électricité est parmi les moins génératrices de CO₂ en Europe. Ainsi en 2019, sur base des données de l'agence européenne de l'environnement (European Environment Agency, 2020), la production d'un kWh d'électricité en Belgique émettait 167g de CO₂e. Ce qui est bien moins que la moyenne européenne de 275g qui est fortement impactée par les productions de pays comme, par exemple, l'Estonie ou l'Allemagne qui recourent encore beaucoup aux polluantes centrales à charbon (respectivement 891g et 338g).

¹⁹ La masse est déterminé en multipliant la section de la poutre par sa longueur et par la masse volumique de l'acier.

²⁰ La notation usuelle CO₂e sera utilisée dans la suite de ce travail pour agréger les quantités des différents gaz responsables du réchauffement climatique en une quantité équivalente de CO₂.

Evidemment ces valeurs fluctuent d'année en année selon la variation du mix énergétique, en conséquence de décisions politiques ou techniques (telles que la fermeture, ponctuelle ou non, de centrales nucléaires et l'implantation de nouvelles éoliennes) ou suivant des évènements naturels (tels que des années plus ensoleillées, plus venteuses,...). Afin de prendre en considération cette variabilité, la quantité de CO_{2e} par kWh d'électricité prélevé du réseau va être calculée sur base de la moyenne de ces quantités observées lors des 5 dernières années. Les données sont disponibles sur le site de l'agence européenne de l'environnement et celles relatives à la période d'intérêt, à savoir de 2015 à 2019 inclus²¹, sont listées à la *Table 6.01*. La valeur moyenne ainsi calculée pour la Belgique est de 190g/kWh. A titre de comparaison, la moyenne européenne est bien plus élevée à 297,8g/kWh.

(en g de CO _{2e} par kWh)	2015	2016	2017	2018	2019	Moyenne
Belgique	227	172	177	207	167	190
UE (28 pays)	324	305	300	285	275	297,8

Table 6.01 : Évolution du facteur de conversion de la consommation en CO_{2e}
(Sur base des données l'European Environment Agency (2020))

6.3.2. Facteurs de conversion pour le gaz

Les émissions polluantes du gaz ne fluctuent pas selon une variation d'un mix énergétique, et sont donc plus stables dans le temps. La valeur du facteur de conversion sera ainsi directement reprise du site d'Energieplus à 198 gCO₂/kWh et utilisée identiquement pour chaque année (Energieplus, 2007a). Cette valeur est également celle considérée par Sibelga (gestionnaire du réseau de gaz bruxellois) (Energuides, 2021).

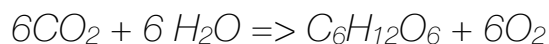
6.4. Hypothèses

Différentes hypothèses sont considérées dans ce travail à propos de l'Analyse du cycle de vie.

6.4.1. Carbone biogénique

Une première hypothèse concerne le choix de prendre en compte le carbone biogénique. On le retrouve dans les matériaux à base végétale comme le bois de construction ou encore les isolants bio-sourcés. Ce carbone consiste en du carbone qui est emprisonné dans la plante/l'arbre après avoir été capté lors de la photosynthèse et ce durant la vie du végétal (Karibati, 2018). Comme visible à la *Formule 6.01*, sa création est due à la captation de CO₂ de l'atmosphère.

²¹ Au Point 5.4.3, il avait été constaté le caractère peu représentatif de l'année 2020 pour le coût de l'électricité. De manière cohérente, cette année 2020 n'est pas considérée ici.



Formule 6.01 : Équation de la photosynthèse

Cette séquestration dans le végétal est ainsi bénéfique à l'environnement, résultant en la possibilité de décompter le CO₂ consommé de l'impact environnemental des produits. Ce décompte est notamment présent dans les fiches EPD des produits bio-sourcés dans le module A₁.

Par contre, lors de la décomposition ou de la combustion du matériau, le CO₂ est ré-émis dans l'atmosphère, raison pour laquelle de nombreuses études ne le considèrent pas. Cependant, la réutilisation ou le recyclage étant réalisable pour ces matériaux, il est possible de retarder fortement la ré-émission. De plus, lorsque le matériau sera réellement en fin de vie, une valorisation énergétique de celui-ci sera possible permettant d'économiser des matières premières non renouvelables et de diminuer les rejets de CO₂. Enfin, les sites de production de ces produits (culture, foresterie,...) consistent en des puits carbonés s'ils sont gérés durablement (Karibati, 2018). Ceux-ci contribuent à rendre les objectifs européens mentionnés dans la *Section 1. Introduction* atteignables (Bouchaud, 2021).

Il est ainsi décidé dans ce travail de conserver le décompte du CO₂ capté tel qu'indiqué dans les fiches EPD pour réellement montrer l'intérêt écologique que ces produits représentent. En ne considérant pas les phases de fin de vie, ne pas prendre en compte cette captation sur le module A₁ amènerait à perdre complètement de vue l'avantage d'utiliser des matériaux bio-sourcés.

6.4.2. Émissions de gaz à effet de serre dues aux consommations énergétiques

Une seconde hypothèse concerne l'impact carbone associé à l'achat d'énergie. Cet impact, correspondant à la quantité de CO₂e émise pour produire et fournir l'énergie nécessaire au bâtiment, sera calculé sur base de la consommation en kWh multipliée par le facteur de conversion correspondant.

Cependant, dans le cas de l'électricité, ce facteur évolue constamment. Ceci s'explique par le fait qu'il est dépendant du mix énergétique en application en Belgique. Mix qui change en permanence: une période venteuse ou fortement ensoleillée fait augmenter la part des énergies renouvelables et donc baisser la quantité moyenne de CO₂e émise pour produire un kWh d'électricité, ou, inversement, un hiver plus dur ou la fermeture d'une centrale nucléaire auront tendance à faire augmenter cette quantité vu le besoin de recourir à des centrales gaz ou charbon pour répondre à la demande.

Pour ce travail, une valeur moyenne du facteur sur les cinq dernières années sera donc considérée pour diminuer l'impact de ces événements particuliers. La même valeur sera ensuite conservée pour les 50 ans de l'étude.

Ce dernier point est également une hypothèse importante car actuellement le facteur pour l'électricité est de plus en plus faible d'année en année grâce au développement des énergies renouvelables. Mais ceci s'additionne dans le même temps à la sortie du nucléaire prévue pour 2025. Fermeture qui risque fortement de produire un retour en arrière via le besoin de remplacer cette production propre d'électricité par un autre procédé plus polluant. Déjà aujourd'hui de nouvelles centrales gaz sont en projet, pour une ouverture à l'horizon 2025 (Belga, 2021). Ces évolutions futures sont ainsi ignorées pour cette étude car leur impact réel n'est actuellement pas quantifiable. Le développement des énergies renouvelables pourra-t-il compenser la fermeture des centrales? Et si oui, à quel horizon?

6.5. Monétisation

L'impact sur le réchauffement climatique des matériaux employés ainsi que de l'énergie consommée est monétisé selon la méthode MMG. Celle-ci estime qu'un kilo d'équivalent CO₂ émis coûterait 0,05€ à compenser (OVAM, 2018).

Tout comme les prix de l'étude de coût sont actualisés, les compensations financières arrivant après l'année 0, le seront également afin d'avoir un système d'évaluation cohérent tout au long de l'étude. Ceci permettra notamment de comparer les différents scénarios sur base de leur coût théorique total en agrégeant le coût de leur cycle de vie et leur coût environnemental.

Le taux d'évolution suivra l'inflation (+1,6 %/an) tandis que le taux d'escompte suivra le taux d'intérêt à 10 ans (+0,6 %/an) comme pour l'étude ACCV. Puisque l'inflation est supérieure au taux d'intérêt, il est attendu que, bien que les consommations pour un scénario donné soient identiques d'année en année, le coût actualisé pour la compensation financière de leur impact environnemental sera lui de plus en plus important d'année en année.

6.6. Analyse de la sensibilité

L'hypothèse réalisée sur le facteur de conversion des kWh électriques en émissions de CO₂e est assez importante. Une analyse de la sensibilité est donc réalisée pour évaluer l'impact de celle-ci.

Ainsi les différentes analyses sont réalisées à nouveau, avec des valeurs différentes du facteur de conversion des kWh électriques en CO₂e. Elles sont réalisées une fois avec une valeur du facteur inférieure de 50% et une fois avec une valeur supérieure de 30%. Les valeurs testées sont donc 0,095 kg/kWh et 0,247 kg/kWh. La première permet de simuler une production moins émettrice de gaz à effet de serre de l'électricité en moyenne sur la durée de l'analyse, par exemple grâce à un prolongement du nucléaire et/ou à un important développement des énergies renouvelables. C'est une valeur optimiste. La deuxième simule elle un retour à une production plus polluante d'électricité pour compenser, par exemple, une fermeture des centrales. Elle est, elle, assez pessimiste.

7. Présentation du cas d'étude

Cette section commence par indiquer et justifier le choix du cas d'étude qui a été fait pour ce travail. Elle présente ensuite succinctement ses plans et organes principaux. L'organisation du bâtiment, le détail de ses parois et les différents systèmes (ventilation, éclairage, chauffage) sont ainsi abordés. L'utilisation qui est faite du lieu est également mentionnée.

7.1. Choix du bâtiment de référence

Le cas d'étude qui va être choisi servira de base aux différents scénarios que ce travail va évaluer. Puisque l'évaluation de ces scénarios servira à l'élaboration des conclusions, son choix est lourd d'impact. Il est important de le choisir représentatif de la majorité des salles qui se construisent en Belgique afin de pouvoir généraliser les observations et les appliquer à de futures réalisations.

L'infrastructure qui a été choisie est le hall d'athlétisme indoor de la ville de Hannut (*Fig. 7.01a*). Inauguré en 2021 bien qu'utilisé depuis fin 2019, il est un des plus récents de Wallonie (Renier, 2021). Cette nouveauté a été un des critères significatifs pour le choix du cas d'étude. Être récent assure le respect des normes PEB actuelles et déjà une certaine réflexion sur l'impact environnemental. Pour cette raison et parce qu'ils sont uniquement dédiés à l'athlétisme, le stade indoor de Louvain-La-Neuve (2019, *Fig. 7.01b*) et la salle indoor de Mons (2016, *Fig. 7.01c*) auraient également pu être des choix pertinents. Le premier a cependant été rejeté car sa taille et son budget ne correspondent ni à ce qui s'est fait jusqu'ici en Belgique ni à ce qui y est attendu²². La salle de Mons, elle, correspondait bien à ce qui était recherché. Elle a donc fait partie, avec Hannut, des deux salles pré-sélectionnées, et ses informations collectées. Cependant, un manque de données précises l'a finalement écartée, au profit de la salle du club d'athlétisme de Hannut (FCHA).



Figure 7.01 : Principaux cas d'étude potentiels.

(De gauche à droite: a. Hannut (Renier, 2021); b. LLN (Eiffage, 2015); c. Mons (Moha, 2021))

²² Comme déjà abordé à la Section 1. Introduction

7.2. Description générale

Le plan de la salle est des plus simples (*Figure 7.02*). Les principales fonctions "secondaires" comme les vestiaires, toilettes ou cafétéria étant déjà présentes sur le site du club d'athlétisme d'Hannut dans leur clubhouse originel (en grisé sur la figure), le nouveau bâtiment n'accueille que l'infrastructure sportive en tant que telle: la piste et ses installations pour les concours (sauts et lancers). Il en résulte un bâtiment comprenant un seul espace de 2200 m².

La salle est configurée prioritairement comme une salle d'entraînement, sans espace prévu pour l'accueil de spectateurs. Elle présente une ligne droite à 6 couloirs de 60m, une cage pour le lancer du poids, un bac à sable et deux tapis pour les sauts; un pour la hauteur et un pour la perche; et enfin une zone protégée pour accueillir les différentes installations techniques. L'accès principal s'y fait par le côté "piste", entre la salle et le clubhouse existant. Un deuxième accès, prévu pour permettre l'entrée du matériel depuis le parking, est installé, tout comme deux sorties de secours, sur la façade nord-ouest.

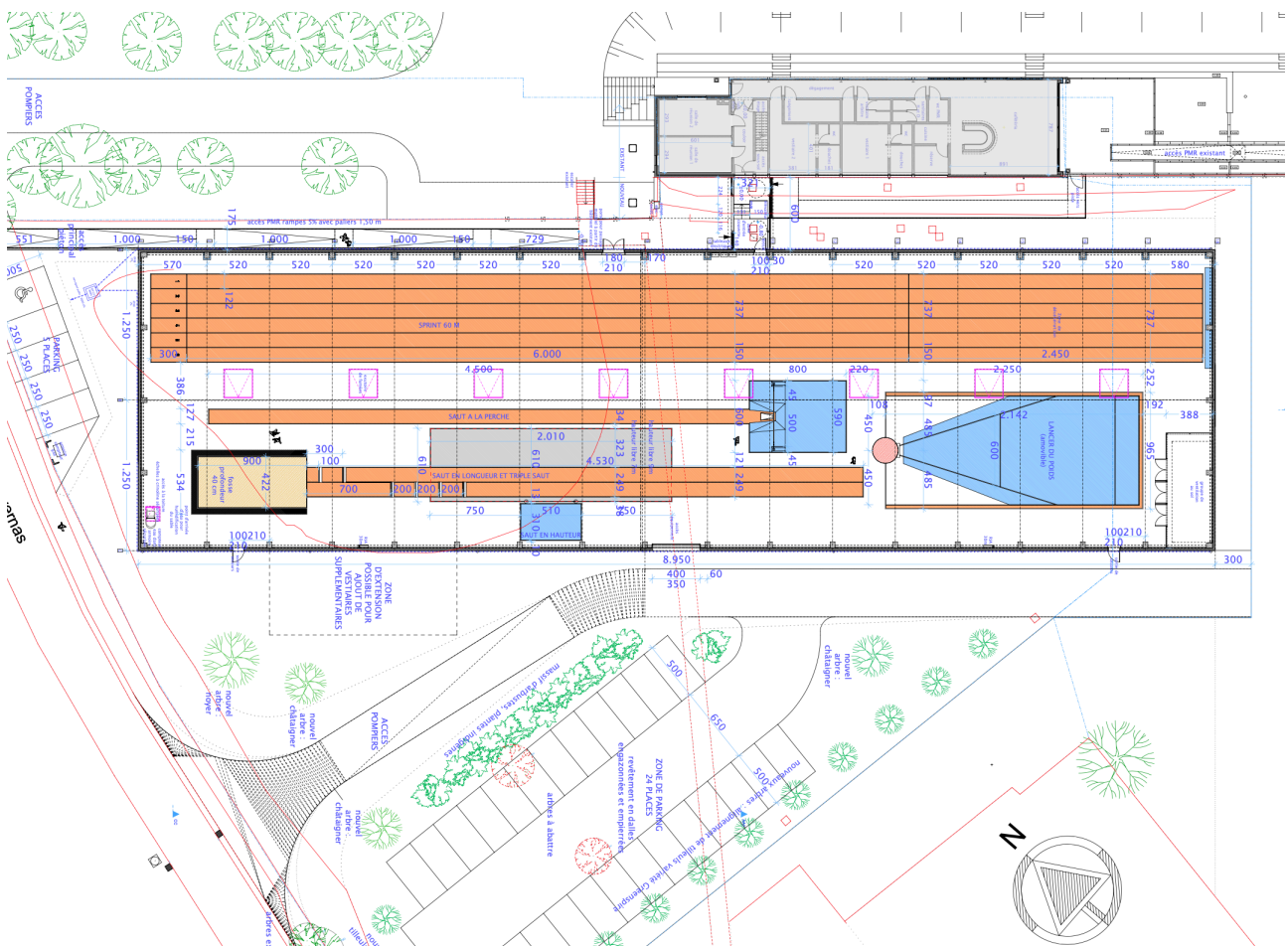


Figure 7.02 : Plan intérieur du cas d'étude.
(Plan fournis par Renier (2021))

La présence de deux différentes hauteurs sous plafond est clairement identifiable: 7m dans la première moitié, côté route, et 9m dans la deuxième partie où le saut à la perche doit être possible. Un aperçu de cette différence de hauteur est présenté via une coupe à la *Figure 7.03*.

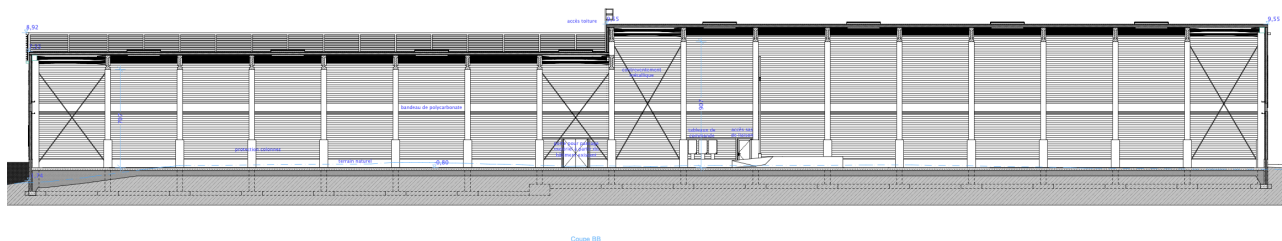


Figure 7.03 : Coupe du cas d'étude.
(Coupe fournie par Renier (2021))

D'un point de vue occupation, la salle sera largement exploitée. En journée, elle sera utilisée par les écoles de la commune tandis qu'en soirée et le weekend le club d'athlétisme en prendra possession pour ses entrainements. Plusieurs sportifs belges de haut niveau s'y entraînent également fréquemment. Les vacances scolaires ne consistent pas en une fermeture de la salle puisque les entrainements du FCHA y sont maintenus et que des stages communaux ou privés y sont organisés.

7.3. Système constructif

La structure du complexe consiste en un système poteaux-poutres en béton. Les différents composants sont préfabriqués puis assemblés sur le site. Les poteaux reposent sur une semelle filante.

Les parois latérales et la toiture sont réalisées de différentes façons selon leur positionnement. Les compositions de chacune d'elles, telles que reprises dans le rapport PEB du bâtiment, sont les suivantes (Renier, 2021):

- Pour la toiture, le panneau utilisé possède une épaisseur de 10 cm. De la marque Jorisode, l'âme du panneau est constitué de polyisocyanurate (PIR) et est comprise entre deux tôles d'acier. Ce panneau offre un coefficient de transmission thermique (valeur U) de $0,213 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Jorisode, 2021).
- Pour les pignons: un panneau sandwich à âme PIR est à nouveau utilisé. Il est cette fois-ci plus épais, 12 cm et permet ainsi d'atteindre une valeur U de $0,193 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Jorisode, 2021).
- Pour les murs latéraux, ils utilisent un panneau sandwich à âme PIR de 10 cm pour un U total de $0,223 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Jorisode, 2021).
- Le sous bassement (les 60 premiers cm des murs) et la partie enterrée consistent en une couche isolante en PIR ($\lambda = 0,022 \text{ W/mK}$) de 10 cm comprise entre deux épaisseurs de béton (6 et 10 cm) (Unilin, 2021). Cette composition permet d'atteindre une résistance thermique totale de $4,802 \text{ m}^2\text{K/W}$. Cette paroi est prolongée 1 m plus

bas que le sol afin de permettre la non-isolation de la dalle en utilisant la méthode du U équivalent. Cette méthode consiste à n'isoler que "la périphérie des planchers en contact avec le sol" pour atteindre la valeur U réglementaire (SPW, 2015). Elle est particulièrement adaptée pour les planchers de grande superficie (comme dans les halls sportifs) car elle permet une économie importante de matériaux en ne nécessitant pas d'atteindre en tout point de ceux-ci la résistance thermique réglementaire (SPW, 2015).

Le sol est ainsi simplement constitué d'une dalle de béton sur terre plein et du revêtement spécifique d'athlétisme. Pour ce revêtement, les concepteurs ont du choisir entre deux types: un préfabriqué en caoutchouc et un coulé sur place en polyuréthane (PU). Le préfabriqué, habituellement désigné par la dénomination "Mondo" du nom de la marque, étant plus cher et davantage orienté performance, leur choix s'est porté sur le PU plus en adéquation avec les ambitions d'entraînement de la salle (Hirschland, 2021). Finalement, la paroi "sol" présente une résistance thermique de $0,24 \text{ m}^2\text{K/W}$ pour un U équivalent (U_{eq}) de $0,22$ atteint grâce à l'enfouissement de l'isolant énoncé ci-dessus.

Un bandeau en polycarbonate translucide d'une hauteur de 60cm est installé sur tout le pourtour de la salle à 3,5 m du sol et huit exutoires de fumées sont placés en toiture. L'accès à la salle est assuré par deux portes vitrées et une porte de garage pour le matériel. Deux sorties de secours sont également présentes.

Les différentes valeurs caractéristiques des cloisons sont résumées à la *Table 7.01*. Cependant, une donnée primordiale est manquante sur ce bâtiment: son taux d'infiltration. L'étanchéité à l'air n'ayant pas été testée sur le bâtiment, une hypothèse sur sa valeur doit être réalisée. Il aurait pu être choisi de travailler avec la valeur reprise dans le rapport PEB mais celle-ci consiste en la valeur par défaut de la PEB ($12 \text{ m}^3/\text{hm}^2$). Elle est donc trop pessimiste et n'amènerait pas à des résultats pertinents. Il est donc choisi de plutôt considérer la valeur de $8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ correspondant à la valeur moyenne en nouvelle construction (SPW, 2016b). Vu la typologie assez industrielle de la construction, cette valeur semble tout à fait adaptée puisqu'il est attendu que l'étanchéité à l'air ne fasse pas partie des qualités premières de celle-ci.

7.4. Techniques spéciales

Les plans des techniques spéciales sont également assez simples. La salle est chauffée par 5 aérothermes gaz, placés en hauteur, le long des deux parois principales. Ceux-ci sont surdimensionnés afin de pouvoir atteindre très rapidement la température de confort lorsque la salle est utilisée tout en la laissant descendre lorsqu'elle est inoccupée. Vu la hauteur de l'espace et le chauffage par aérotherme et non via des panneaux rayonnants, le risque de voir stagner l'air chaud au plafond est grand. Pour éviter ce phénomène de stratification, cinq dispositifs déstratificateurs sont installés à intervalles réguliers au plafond de la salle.

La ventilation a été réalisée conformément à l'annexe 3 de la PEB, celle relative à la ventilation des bâtiments à destination non-résidentielle. Le système installé pulse et extrait $5.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Il respecte donc bien la norme qui en demande pour cette surface et activité $4840 \text{ m}^3/\text{h}$ (SPW, 2016a). Le système est de plus équipé d'un récupérateur de

chaleur. La distribution se fait via 17 bouches placées à intervalles réguliers à 6,5m du sol. La pulsion se fait le long du mur "Nord-est" et l'extraction le long du mur "Sud-ouest".

Le système d'éclairage utilisé est constitué de 102 tubes LED de 1,5m "Magnus sport led" de la marque Veko. Le modèle utilisé (LSN-N-352) est spécialement destiné aux halls sportifs (Veko, 2019).

Parois	Catégorie	Valeur
Vitrage Polycarbonate translucide	Facteur solaire	0,28
	Facteur lumineux	0,44
	Surface	137m ²
	U	0,99
Murs pignon Panneau sandwich (JI wall 1150) - PIR - 12 cm	Surface	460m ²
	U value	0,19
Murs latéraux Panneau sandwich (JI wall 1150) - PIR - 10 cm	Surface	1350m ²
	U value	0,22
Murs sous bassement Voile béton - PIR - 10 cm	Surface	364m ²
	U value	0,21
Toiture Panneau sandwich (JI roof 1000) - PIR - 10 cm	Surface	2200m ²
	U value	0,21
Sol Dalle béton - 25 cm	Surface	2200m ²
	U value	4,1
	Ueq value	0,22
Porte de garage	U value	1,37
	Surface	14m ²
Issue de secours	U value	1,12
	Surface	4,2m ²
Porte vitrée d'entrée	U value	1,14
	Surface	3,8m ²
Porte vitrée secondaire	U value	1,62
	Surface	2,1m ²

Table 7.01 : Récapitulatif de l'encodage des parois
(Sur base des informations reprises dans cette section)

8. Modélisation dans DesignBuilder (EnergiePlus)

Afin de déterminer le besoin en énergie du bâtiment, que ce soit pour le chauffer, l'éclairer ou faire fonctionner ses systèmes auxiliaires, il est modélisé dans le programme DesignBuilder. Ce programme permet également de déterminer la température observée à l'intérieur de la salle à chaque heure et d'ainsi en évaluer le confort vis à vis de la surchauffe. La modélisation a été réalisée aussi fidèlement que possible sur base des informations récoltées, de connaissances personnelles et d'autres sources externes. La suite de cette section va passer succinctement en revue les principaux encodages qui ont été réalisés. Les différentes sources utilisées ont été triangulées autant que possible afin d'assurer un maximum de fiabilité.

8.1. Paramétrage

8.1.1. Données climatiques

Pour simuler l'impact de la météo sur les variables du bâtiment, DesignBuilder nécessite un fichier météo reprenant des relevés horaires de différentes données et ce, sur une période d'un an. Elles doivent, de plus, être propres au site où l'on est implanté. Ces données reprennent notamment la température sèche (*dry bulb*), la température humide (*wet bulb*), l'humidité ambiante ou encore l'irradiation solaire.

Afin de fournir des valeurs pertinentes, les données climatiques qui sont utilisées doivent être extraites d'une station météorologique proche et située dans un même type d'exposition (notamment exposition au vent) que le bâtiment étudié. Le fichier météo utilisé pour représenter le climat Hannutois est celui créé sur base des relevés obtenus à la station météo de l'aérodrome de Beauvechain (BE)²³. Celle-ci est située à seulement 25km du cas d'étude. Leur situation est bien comparable: une altitude semblable (113m à Beauvechain contre 135m à Hannut) et un rapport similaire au vent (pourtour assez dégagé dans les deux puisque la station est située sur un terrain aéroportuaire et que la salle est entourée d'espace libre au vent avec le terrain dégagé de la piste extérieure, un champ et la cour de récréation de l'école voisine autour d'elle).

Le fichier utilisé est du type TMY²⁴. Dans un fichier de ce type, l'année représentée a comme valeurs pour les différents mois celles des mois considérés les plus typiques sur une période donnée. Sa création suit la norme ISO 15927 (2005). Cette norme impose notamment que le fichier soit basé sur une période de minimum 10 ans de relevés horaires. Elle fournit également les méthodes à suivre pour choisir les mois

²³ Le fichier météo a été téléchargé sur "climate.onebuilding.org".

²⁴ TMY = année météorologique typique

caractéristiques et pour mettre à jour les valeurs des premières et dernières 8 heures²⁵. Dans le cas du fichier choisi, la période d'observation est 1973-2019, soit une période bien plus importante que le minimum requis de dix années. Les mois considérés caractéristiques et qui constituent donc l'année météorologique typique sont repris à la *Table 8.01*.

Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
2011	1974	1977	2008	2005	1983
Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1982	2016	1981	1987	2004	2012

Table 8.01 : Composition de l'année météorologique typique dans le fichier "Beauvechain" (Sur base du fichier météo créé par Climate.onebuilding (2021))

8.1.2. Activité

Comme énoncé par Artuso et Santangeli en 2008, "Sports halls consumptions are closely related to the sport activity, the timetable of the sports center, the public attendance during the matches and the site-specific climate conditions" (Accili, 2016). L'encodage des données "activité" doit donc recevoir une attention particulière.

- Planning d'occupation

Une des principales particularités de ce type de bâtiment est ainsi son planning d'occupation. Contrairement à un immeuble de bureaux qui ne vit généralement qu'entre 8h et 18h en semaine ou à du logement, inoccupé en journée, ce type d'infrastructure verra son utilisation s'étaler sur des plages horaires plus étendues et s'intensifiant durant les jours de congé et les heures de fin de journée.

La norme PEB, pour ce genre d'activité accueillie (Club sportif: salles d'aérobic, salle de fitness, club de bowling), indique de considérer une occupation du bâtiment de une personne par 10 m² pour dimensionner le système de ventilation (Annexe 3 de la PEB: SPW, 2016a). Cependant, la salle n'étant pas utilisée à pleine capacité tout au long de la journée, une adaptation de l'apport d'air frais durant les heures plus creuses est prévue.

Le planning d'occupation consiste en, pour chaque heure de la journée, un facteur multiplicateur compris entre 0 et 1 qui servira à multiplier la valeur de densité d'occupation fixée donc à 0,1 pers/m². Les heures avec un facteur égal à 1 seront donc des heures opérant à pleine capacité tandis que des heures avec un facteur nul consisteront en des heures de fermeture de la salle.

²⁵ L'importance de modifier les dernières 8 heures est due à la nécessité d'assurer une continuité naturelle entre les différents mois sélectionnés; ceux-ci étant habituellement non consécutifs puisque extraits d'années différentes.

Le planning a été créé sur base de l'ISO 18523 (2016). Il a ensuite été comparé à celui utilisé dans le travail "natural ventilation" (Accili, 2016) et a reçu des apports de l'auteur. Le résultat est le suivant: la salle est en pleine capacité de 14h à 21h en semaine et de 9h à 21h le week-end. Elle fonctionnera par contre à mi capacité de 8h à 14h et de 21h à 22h en semaine et de 8h à 9h le weekend. La mi-capacité est également prévue de 9h à 22h durant les congés scolaires²⁶.

Ce planning, suivant le minimum requis par la norme de ventilation, va surévaluer le nombre d'occupants présents afin d'être certain que la quantité d'air frais amenée ne soit jamais insuffisante. DesignBuilder la calcule effectivement en multipliant le nombre de personnes présentes par 22 m³, valeur requise à l'annexe 3 de la PEB (espace destiné à l'occupation humaine en zone non-fumeur (SPW, 2016)). Cependant ce planning influence également un deuxième paramètre: les gains métaboliques internes. En effet, pour ceux-ci, le programme multiplie le nombre de personnes présentes par la valeur métabolique liée à l'activité observée. Surévaluer le nombre de personnes est donc ici problématique puisque cela résultera en de trop importants apports internes augmentant la surchauffe et diminuant le besoin de chauffage de façon erronée. Afin de contrer cet effet, la valeur métabolique utilisée sera réduite afin de compenser la surévaluation.

Il est important de remarquer que la création d'un horaire d'occupation régulier pour ce genre d'infrastructure est particulièrement complexe, l'occupation réelle variant selon la période de l'année et la météo extérieure notamment. Le planning réalisé pour ce travail est disponible à l'Annexe 2, il a été réalisé aussi fidèlement à la réalité que possible.

- Vacances

Comme vu dans le planning d'occupation, un horaire particulier est prévu pour les périodes de vacances scolaires. Celles-ci doivent donc être encodées dans le programme via la création d'un planning. Les dates^{27 28} qui y sont encodées sont reprises à la Table 8.02.

Nom	Début	Durée	Nom	Début	Durée
Congé de détente	16 février	7 jours	Congé d'automne	27 octobre	7 jours
Vacances de printemps	5 avril	14 jours	Vacances d'hiver	22 décembre	14 jours
Vacances d'été	1 juillet	62 jours			

Table 8.02 : Dates de début et durée des vacances considérées

²⁶ Le planning récapitulatif complet est disponible à l'Annexe 2

²⁷ La modélisation dans DesignBuilder ayant été achevée avant l'annonce de modification du calendrier scolaire par les autorités compétentes, les vacances considérées ici sont celles du calendrier actuel, en application jusqu'en juin 2022.

²⁸ Les dates de début varient en réalité d'années en années selon les dates des fêtes religieuses (Pâques, Noël, ...). Leur durée ne changeant pas et leur position annuelle restant malgré tout similaire, l'erreur créée est négligeable.

- Habillement et taux métabolique

Deux valeurs sont utilisées pour prendre en compte les personnes dans la salle en tant que telles: leur habillement et leur taux métabolique.

La première, l'habillement, est fonction de "l'isolation" que fournissent aux occupants leurs vêtements. Il s'agit d'une résistance thermique agissant sur les transferts de chaleur entre un corps humain et l'environnement alentour. Elle s'exprime en clo, un clo valant $0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$. Plus ils sont couverts, plus leur isolation est importante et plus ils conservent leur chaleur. Les sportifs s'entraînant en intérieur étant habituellement simplement vêtus d'un t-shirt et d'un short (ou collant long lorsque les températures sont plus fraîches), leur isolation est assez faible. Elle est ainsi estimée à 0,4 clo en été et 0,5 clo en hiver (Energieplus, 2007b).

La deuxième valeur d'intérêt, le taux métabolique, est fonction de l'activité effectuée par les occupants et par leur surface corporelle. Pour la salle de sport d'un hall sportif, la valeur moyenne de 157 W par personne adulte est retenue²⁹ (ISO 8996, 2004 et ISO 18523, 2016). Valeur ramenée à 135 W par occupants en considérant que le public y est majoritairement des enfants ou adolescents. DesignBuilder multipliera donc cette valeur par le nombre de personnes présentes selon les indications du planning d'occupation. Cependant, comme abordé lors de la présentation de ce dernier, le nombre de personnes y est surévalué. Afin de ne pas fausser les résultats, un facteur correcteur va être appliqué au taux métabolique. En considérant une occupation réelle aux heures creuses d'occupation de la salle égale à 2 classes scolaires, soit 60 personnes, on obtient une occupation maximale (aux heures pleines) de 120 personnes, ce qui est cohérent avec les activités d'un club d'athlétisme. Le facteur correcteur à considérer est donc 0,55 et la valeur corrigée entrée pour le taux métabolique est 75 W/personne.

- Température de confort

La dernière valeur particulière à encoder dans DesignBuilder pour décrire l'activité hébergée est la température de confort à atteindre. Pour un espace où une activité sportive est pratiquée, le guide wallon conseille de prévoir une température de 17°C (Matriciel, 2011). C'est donc cette valeur qui est encodée.

Une seconde température doit être fournie, elle correspond à la température minimale à maintenir dans l'espace même lorsque la salle est inoccupée. Pour celle-ci la valeur de 14°C a été choisie. Elle assure une remontée suffisamment rapide à 17°C lorsque la salle ouvre, tout en permettant de grosses économies de chauffage, durant la nuit notamment.

Un nouveau planning doit donc être défini pour indiquer les heures où la pleine température de 17°C doit être maintenue et celles où la température "setback" est suffisante. Ce planning "chauffage" est défini très simplement: la température pleine est

²⁹ Toutes les personnes ne pratique pas l'activité physique simultanément. Le taux métabolique choisi en tient donc compte.

prévue de 7h à 22h tous les jours, et la "setback" le reste du temps. La prévoir dès 7h et non à 8h lorsque la salle commence à être occupée a pour but de laisser une heure à la température pour monter et ainsi être adéquate dès l'ouverture.

8.1.3. Construction

La salle est modélisée conformément à la description qui en a été faite à la *Section 7. Présentation du cas d'étude*. Les différentes parois latérales et la toiture présentent les valeurs U mentionnées dans le rapport PEB et présentées à la *Table 7.01*. Le sol a, lui, été encodé afin de voir sa valeur U correspondre à la valeur U_{eq} du bâtiment réel pour être représentatif de la réalité sans complexifier à l'excès la modélisation.

Le bâtiment étant créé sur un terrain partiellement en pente, les abords du modèle sont modélisés à l'aide de blocs/composants "ground" (en vert sur la *Figure 8.01*). Le clubhouse existant projette une ombre sur le bâtiment à certaines heures, il est donc également intégré dans le DesignBuilder comme un composant (en rose).

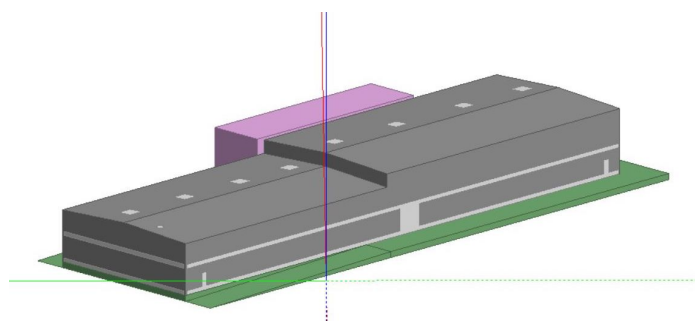


Figure 8.01 : Cas d'étude modélisé dans DesignBuilder

8.1.4. Techniques spéciales

- Éclairage

L'éclairage horizontal (en lux) nécessaire à prévoir dans une salle de sport est défini dans la norme EN 12193 de 2019 relative à l'éclairage des installations sportives. Elle sert de base à l'encodage de l'éclairage dans DesignBuilder pour ce travail, en complément des fiches techniques des tubes Led utilisés. Selon cette norme, l'éclairage minimum à assurer varie suivant la destination et l'utilisation de l'aire de sport.

La première distinction faite dans la norme est selon l'activité pratiquée: un éclairage plus important sera à prévoir pour une salle accueillant des sports de raquettes que pour une salle dans laquelle se pratique de l'athlétisme ou de la gymnastique. La deuxième distinction est faite sur base du niveau de pratique qui sera accueilli dans l'espace. Trois classes sont définies pour caractériser celui-ci.

De la plus à la moins demandeuse en éclairage, on retrouve (EN 12193, 2019):

- **La classe I** pour toutes les compétitions de niveau local à international ainsi que les entraînements de haut niveau;
- **La classe II** pour les entraînements et les compétitions locales et régionales;
- **La classe III** pour les activités scolaires, les entraînements et les compétitions locales.

Pour l'athlétisme en salle, les valeurs ainsi requises par la norme sont reprises à la *Table 8.03*. Les valeurs pour le tennis et le tir à l'arc y sont également reprises à titre de comparaison.

Activité	Classe I	Classe II	Classe III
Athlétisme	500 lux	300 lux	200 lux
Tennis	750 lux	500 lux	300 lux
Tir à l'arc	200 lux	200 lux	200 lux

Table 8.03 : Éclairage horizontal minimum pour un hall destiné à l'athlétisme
(Sur base de la norme européenne EN 12193 (2019))

Sur base de l'utilisation planifiée de la salle, le programme d'utilisation de l'éclairage utilisé dans DesignBuilder a été créé de sorte à comprendre 70 heures à 300 lux (entraînement "classique") et 28 heures à 500 lux (entraînement "haut niveau" et compétition) chaque semaine.³⁰ Il est considéré qu'aucune utilisation de la salle n'est possible sans recours à l'éclairage artificiel au vu du peu d'apport de lumière naturelle. Les luminaires utilisés, ont, selon leur fiche technique, un ratio lumen/watt moyen de 150 (Veko, 2019). La puissance de l'éclairage est finalement calculée pour DesignBuilder à 0,8 W/m² et par 100 lux.

- Système de chauffage

La modélisation de l'Hvac dans DesignBuilder a été réalisée via l'interface détaillée qui rend disponible davantage de systèmes comme un système d'émission de chaleur à air pulsé ou encore des pompes à chaleur.

Le système de chauffage est constituée de trois parties. Puisqu'il n'est pas possible dans DesignBuilder d'utiliser des aérothermes au gaz, il a été nécessaire de les modéliser séparément avec d'un côté un aérotherme eau et de l'autre une chaudière gaz, et en les connectant par une boucle d'eau chaude sans perte. Les valeurs utilisées pour l'encodage de la chaudière, notamment pour son rendement, sont celles relatives à la partie production de chaleur de l'aérotherme gaz théorique tandis que les paramètres pour l'aérotherme eau sont ceux relatifs à la partie ventilateur de l'aérotherme gaz théorique.

³⁰ Le planning récapitulatif complet est disponible à l'Annexe 2

Une boucle de refroidissement a également dû être créée car requise par le programme lorsque un aérotherme eau est installé. Puisque le bâtiment réel ne possède pas de système de refroidissement, la boucle a été encodée comme étant inactive en permanence.

- Système de ventilation

Le système de ventilation est, lui, constitué d'une seule boucle, une boucle "air". Celle-ci comprend la centrale de traitement de l'air avec un ventilateur de pulsion, un d'extraction et un dispositif récupérateur de chaleur avec bypass. Sa partie "demande" comprend des bouches de pulsion et extraction localisée dans la zone de sport. Les différents paramètres sont encodés conformément aux valeurs des fiches techniques. Le bypass du récupérateur de chaleur est paramétré de sorte à être actif durant les journées des mois d'été (de mai à septembre). À l'exception du récupérateur de chaleur, aucun système de préchauffage de l'air n'est installé.

8.2. Simulation

Une fois la modélisation terminée, le paramétrage pour la simulation est réalisé. Il est assez simple: il est demandé au programme de simuler le comportement du bâtiment et de ses systèmes durant une année complète, du 1er janvier au 31 décembre. Durant cette période le programme devra considérer un pas de 1 heure. Les résultats attendus en sorties sont principalement les températures intérieures et les apports et déperditions énergétiques durant chaque heure de l'année. Ces résultats sont ensuite téléchargés au format Excel.

8.3. Validation et calibration du modèle

Une fois les résultats de la simulation obtenus, ils devraient être idéalement comparés aux valeurs réelles du bâtiment sur base de factures énergétiques ou encore de campagnes de mesure de température ou de concentration en CO₂ par exemple. Cela permettrait d'assurer leur concordance et le cas échéant, inciterait à revoir l'encodage. Les parties entraînant la discordance devraient ainsi être revues selon un processus itératif. Dans le cadre de ce travail cependant, la salle étudiée ne présente pas l'ancienneté nécessaire permettant d'obtenir des données auxquelles comparer les résultats obtenus. En effet, puisque la salle n'est occupée que depuis fin 2019, à cause de la crise sanitaire, elle n'a pas encore pu opérer à plein régime sur une période suffisamment importante. Il n'y a donc ni relevé ni campagne de mesure disponible. L'utilisation réelle, actuelle, différant ainsi de l'utilisation modélisée, ce type de calibration ne peut être envisagé ici.

La validation peut également être réalisée en comparant les résultats du modèle aux valeurs attendues pour ce genre d'établissement selon des travaux ou observations antérieurs publiés dans la littérature. Les valeurs du modèle seront ainsi comparées aux valeurs observées par Step2Sport durant leur campagne de rénovation. Si les valeurs

sont proches, le modèle sera supposé valide. Cette analyse sera développée ci-dessous, dans la *Section 9. Résultats - Consommation énergétique et confort du cas d'étude*.

8.4. Analyse de la sensibilité et de l'incertitude du cas de base

Il est également possible de réaliser une étude de la sensibilité et de l'incertitude sur le modèle afin de déterminer les principales sources de variabilité éventuelles, c'est à dire celles qui auraient les impacts les plus importants sur les résultats. En réaliser une est, de plus, particulièrement important vu l'existence d'incertitude dans l'encodage de certains paramètres de la modélisation. Pour ce faire, une liste est dressée avec dix des paramètres menant aux plus grandes incertitudes selon la littérature. Ils ont été choisis de sorte à couvrir les valeurs les plus incertaines utilisées dans la modélisation, comme le taux d'infiltration pour lequel une hypothèse avait été réalisée au *Point 7.3* ou encore selon les recommandations trouvées dans la littérature. En particulier, l'étude de sensibilité menée par Labat et Attonaty (2017) sur des immeubles industriels a fourni les principaux paramètres. Bien qu'elle porte sur des bâtiments industriels, ses résultats sont pertinents pour le cas d'étude de ce travail vu son type de construction, industriel également. Des dix paramètres, cinq sont ensuite choisis pour évaluer le modèle.

Les analyses porteront sur la consommation énergétique finale du bâtiment puisqu'il s'agit de l'output qui sera le plus exploité dans la suite du travail. Le fonctionnement de celles-ci est assez simple. DesignBuilder, via son moteur EnergiePlus, réalise un nombre donné de simulations sur le modèle en faisant varier pour chaque une série de paramètres. Elles seront, ici, réalisées avec la méthode d'échantillonnage LHS (*Latin Hypercube Sampling*) et un nombre de simulations (itérations) suffisant que pour observer la convergence des résultats. Pour chacune de ces simulations (les itérations), le programme enregistre la consommation énergétique calculée. Sur base de la variation de celle-ci et des valeurs utilisées pour les différents paramètres, il détermine la responsabilité de chacun de ceux-ci sur la variation constatée. Il utilise pour ce faire un modèle de régression linéaire. Les paramètres se voient ainsi chacun attribuer un coefficient de régression standardisé (SRC) représentant la sensibilité du résultat final par rapport à ce paramètre. Attention cependant, qu'un paramètre qui serait jugé peu impactant sur le résultat total (petit SRC), l'est en comparaison aux autres. C'est à dire qu'il est possible qu'il ait un impact sur la consommation énergétique mais que cet impact est très faible comparé à celui que les autres paramètres ont sur cette consommation.

Il est important de rappeler que l'objectif de la modélisation du cas de base et des scénarios n'est pas tant de quantifier précisément les besoins du bâtiment mais bien de comparer les scénarios à l'aide des différentes simulations réalisées. Ainsi une valeur incorrecte qui se serait glissée dans un des encodages affecterait de façon plus ou moins similaire chacun des cas étudiés et son impact serait donc limité sur l'interprétation des résultats.

8.4.1.Choix des variables

Les cinq paramètres sont choisis de sorte à couvrir les principaux domaines du modèle (construction, gains internes, Hvac, étanchéité et activité). Les 10 variables les plus pertinentes pré-sélectionnées et les 5 finalement choisies sont reprises à la *Table 8.04*.

Domaines	Variables	Unités	États
Construction des parois	Valeur U murs	W/m ² K	/
	Valeur U toit	W/m ² K	Sélectionné
Étanchéité	Taux d'infiltration	m ³ /h.m ²	Sélectionné
Gains internes	Taux d'occupation	pers/m ²	Sélectionné
	Métabolisme	W/pers	/
Hvac	Rendement récupérateur de chaleur	/	/
	Rendement aérotherme	/	Sélectionné
	Puissance des ventilateurs	W	/
Activité	Température de consigne	°C	Sélectionné
	Air frais par personne	l/s.pers	/

Table 8.04 : Choix des variables pour l'analyse de sensibilité

Pour représenter le domaine "construction des parois", la variable jouant sur la valeur U de la toiture a été préférée à celle des murs pour deux raisons principales : la surface de la toiture est plus importante que celle des murs et a donc davantage d'impacts sur le bâtiment. De plus, les transferts de chaleur par mètres carrés y sont généralement plus importants.

Pour le domaine étanchéité, le taux d'infiltration est évidemment conservé car une forte hypothèse avait du être réalisée sur sa valeur. Étudier son impact est donc de première importance.

Pour les gains internes, le niveau de métabolisme n'a pas été retenu de par le fait que son calcul dans DesignBuilder est déjà dépendant du taux d'occupation. Ainsi en faisant varier ce dernier, la valeur du gain interne de chaleur dû à l'activité physique des occupants est également variée.

Au niveau des systèmes de chauffage et de ventilation, le rendement du système de chauffage par aérotherme a été choisi. Il est, en effet, le plus représentatif de ce domaine et il est intéressant d'en vérifier l'impact au vu de la façon dont l'encodage des aérothermes a dû être réalisé (*Section 8.1.4*).

Enfin, la température de consigne a été choisie pour le volet "activité" car elle est connue pour avoir un impact très important sur la consommation. Ce constat a déjà été vérifié lors de différents tests de simulations réalisés sur ce modèle.

8.4.2. Paramétrage des variables choisies

Les cinq variables choisies sont paramétrées de manière similaire à ce qui est fait dans l'étude de Labat et Attonaty (2017). Pour chaque, une valeur moyenne est encodée dans le programme et un écart-type lui indique comment il doit faire varier les différentes valeurs qu'il utilisera au fil des itérations. L'écart-type est plus grand lorsque la variable sur laquelle il est appliqué est fort incertaine. Les distributions sont également tronquées au double de l'écart-type pour éviter les valeurs aberrantes.

- Valeur U toit

Il s'agit de la seule variable discrète sélectionnée. 5 modèles de toiture ont été choisis. Un modèle avec la composition "réelle", deux avec un supplément/retrait de 10% de l'épaisseur d'isolant et deux derniers avec un supplément/retrait de 5% de l'épaisseur d'isolant. La répartition de ces choix entre les itérations suit une loi binomiale basée sur cinq expériences et de probabilité de succès 0,5.

- Taux d'infiltration

Encodé comme ayant une valeur moyenne de $8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, celui-ci fait partie des valeurs les plus incertaines de la modélisation. Pour cette raison, l'écart-type sera pris égal à 1,5 et la distribution tronquée entre les valeurs 5 et $11 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ correspondant à un intervalle centré sur la valeur moyenne et ayant comme borne cette valeur +/- 40%.

- Taux d'occupation

Variable continue à distribution normale dont l'écart-type a été fixé à +/- 20% de la valeur théorique de 0,1 personne par mètre carré (utilisée comme valeur moyenne). De plus la distribution est tronquée à +/- 0,04 de la valeur moyenne.

- Rendement des aérothermes

Afin de pouvoir analyser l'impact d'une légère variation du rendement de l'organe de chauffage, il a été nécessaire de recourir à l'utilisation d'un script. Effectivement, utilisant une modélisation détaillée de l'hvac, les variables par défaut de DesignBuilder ne permettaient pas de cibler une valeur du système de chauffage. Le script permet donc de faire la liaison entre l'étude de sensibilité et les paramètres de l'hvac.

Finalement, le rendement consiste en une variable continue avec un écart-type fixé à 0,04 autour de la valeur moyenne de 0,82. Le graphique est, de plus, tronqué pour ne conserver que les valeurs comprises dans un intervalle ayant pour bornes la valeur moyenne augmentée/diminuée de 10%.

- Température de consigne

Enfin, la dernière variable est également une variable continue à distribution normale. Elle a elle pour valeur moyenne 17°C et pour écart-type 1°C. De plus la distribution est tronquée à +/- 2°C de la valeur moyenne.

Il a été montré, au travers de cette section, l'attention portée à rendre la modélisation aussi proche de la réalité que possible. Un grand nombre de normes ISO et européennes ont ainsi été utilisées. Un travail important a également été réalisé afin de permettre un contrôle de la qualité du modèle et d'en estimer les sources d'incertitudes principales. Il est intéressant de rappeler à ce moment, que si le modèle venait à être jugé fort sensible par rapport à certaines variables testées, cela ne signifierait pas pour autant que les résultats sont incorrects. En effet, même si ils sont particulièrement sensibles à l'encodage de certains paramètres, ces derniers ont été encodés aussi fidèlement que possible sur base de sources pertinentes et reconnues. Ils devront donc consister en "les bonnes valeurs".

9. Résultats - Consommation énergétique et confort du cas d'étude

Dans cette section, les résultats de consommation énergétique et de confort obtenus à l'issue des simulations EnergiePlus (via l'interface DesignBuilder) sont présentés. La validation du modèle est abordée à l'aide de l'étude Step2Sport notamment. Finalement, les résultats de l'étude de la sensibilité et des incertitudes du modèle sont discutés.

9.1. Étude du confort du cas d'étude

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci conformément à ce qui a été décrit dans la *Section 4. Méthodologie pour l'étude du confort*, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 577 heures annuellement.
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 794 Kh. Il est donc bien en dessous de la limite des 1000 Kh et la salle est donc jugée confortable. Les scénarios testés dans la suite de ce travail devront donc idéalement se situer à proximité de cette valeur afin de maintenir le niveau de confort existant.
- La surchauffe est en moyenne de 1,4°C durant les heures d'inconfort.

9.2. Consommation énergétique du cas d'étude

- Les consommations annuelles de gaz et d'électricité sont à peu près identiques avec 42.045 kWh de gaz naturel nécessaires pour assurer le chauffage de la salle et 42.701 kWh d'électricité. En termes de kWh, les deux énergies se valent donc avec 50,4% d'électricité pour 49,6% de gaz. La densité de consommation annuelle est de 38,52 kWh/m².
- La principale contribution de l'électricité vient de l'éclairage avec 30.658 kWh devant la consommation des ventilateurs du système de chauffage et de la VMC.

9.3. Validation du modèle à l'aide de la littérature

Le bâtiment choisi comme cas d'étude est récent. Inauguré en 2021 bien qu'utilisé depuis fin 2019, il n'a, à cause des restrictions dues au coronavirus, pas encore pu être utilisé à sa pleine capacité. Il n'existe donc actuellement pas de relevé indiquant ses consommations réelles en électricité et gaz. Calibrer le modèle sur cette base n'est donc pas possible et sa validation doit recourir à d'autres techniques comme mentionné dans la méthodologie.

Les consommations déterminées par EnergiePlus peuvent être comparées à celles d'autres salles de sports. Ainsi, l'audit énergétique réalisé par Step2Sport sur leurs cas d'étude indique une consommation moyenne des halls sportifs et gymnases de 59,25 kWh/m²an (Step2Sport, 2015b). Cependant dans ceux-ci, une partie de l'énergie est utilisée pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Une production qui n'a pas lieu dans le cas du cas d'étude de ce travail. Il convient donc de retirer cette contribution pour permettre une comparaison pertinente des valeurs. Sur base des données de l'ICAEN, Accili (2016) évalue la part de l'énergie utilisée pour l'eau chaude sanitaire à, en moyenne, 28%. Ainsi, la moyenne de l'étude Step2Sport, sans ECS, devient 42,66kWh/m²an. En comparant cette valeur aux 38,52 kWh/m² obtenus pour ce cas d'étude à l'issue de la simulation, il peut être considéré que cette dernière se trouve dans un intervalle suffisamment restreint que pour être validée.

Bien que ces valeurs soient rassurantes quant aux résultats obtenus avec notre modèle, la forte variation entre les valeurs des infrastructures étudiées par Step2sport ne peut être ignorée. Avec des valeurs s'étalant de 1kWh/m² à pas moins de 108kWh/m², l'écart-type y est important: 37.

Il est donc, en réalité, impossible de valider fiablement le modèle sur base de ces autres halls. Les différences entre les consommations reprises dans l'étude Step2Sport montrent bien la grande influence qu'ont le type d'activité, le taux et planning d'occupation et les caractéristiques climatiques du site sur celles-ci.

9.4. Analyse de la sensibilité et de l'incertitude du modèle (SA et UA)

Puisque la validation n'a pas pu être réalisée de façon suffisamment précise, la réalisation des études de sensibilité/incertitude est d'autant plus importante. Les résultats obtenus pour celles-ci sont présentés ci-dessous aux *Sections 9.4.1 et 9.4.2*.

9.4.1. Analyse de la sensibilité (SA)

L'analyse est tout d'abord réalisée avec 100 itérations pour vérifier la validité de l'encodage. Puis, celui-ci ayant donné des résultats cohérents, elle est à nouveau lancée avec 250 itérations cette fois.

Comme visible à la *Figure 9.01*, les résultats entre ces deux premières analyses ne sont pas totalement concordants. En effet bien que les différentes valeurs soient proches, l'ordre d'importance de deux des variables est inversé entre les deux analyses. La valeur d'isolation de la toiture est jugée plus impactante sur l'énergie consommée que le taux d'occupation dans le cas à 100 itérations mais moins dans le cas à 250.

Dans les deux cas, l'étude du paramètre "rendement du système de chauffage" est jugé non concluante indiquant que l'impact de ce paramètre est très limité. La valeur du coefficient R² est légèrement améliorée. Elle passe de 0,87 à 0,89.

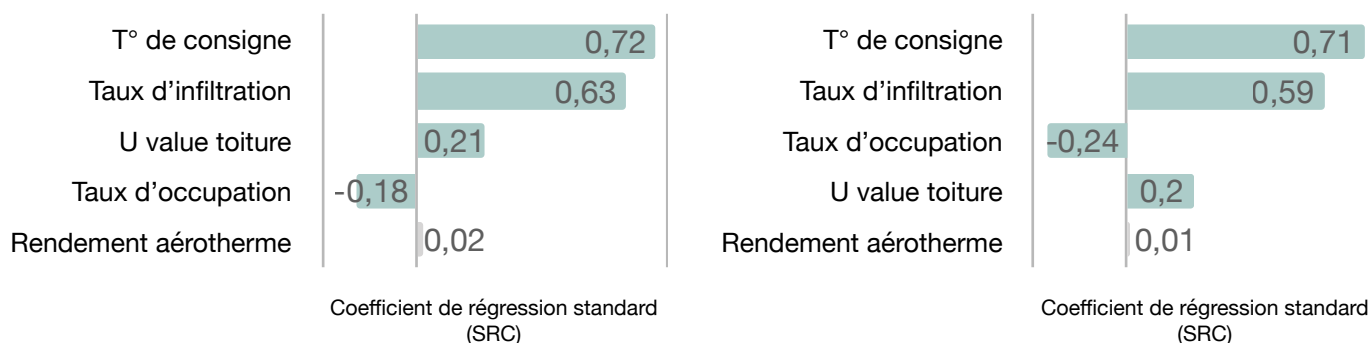


Figure 9.01 : Résultats des études de sensibilités à 100 itérations (gauche) et 250 itérations (droite)

Puisque les résultats ne sont pas complètement concordants et afin d'assurer la convergence des résultats, une nouvelle version basée sur davantage d'itérations va être exploitée.

L'analyse est donc lancée avec, cette fois, 500 itérations. Les résultats sont visibles à la *Figure 9.02*. En les comparant à ceux des 250 itérations, très peu de modifications des valeurs sont visibles et aucun changement d'ordre n'apparaît. De cette convergence des valeurs, il est conclu qu'un nombre suffisant d'itérations a été atteint. La valeur du coefficient R^2 de 0,9 est également meilleure que précédemment. Cette analyse est donc conservée et considérée finale.

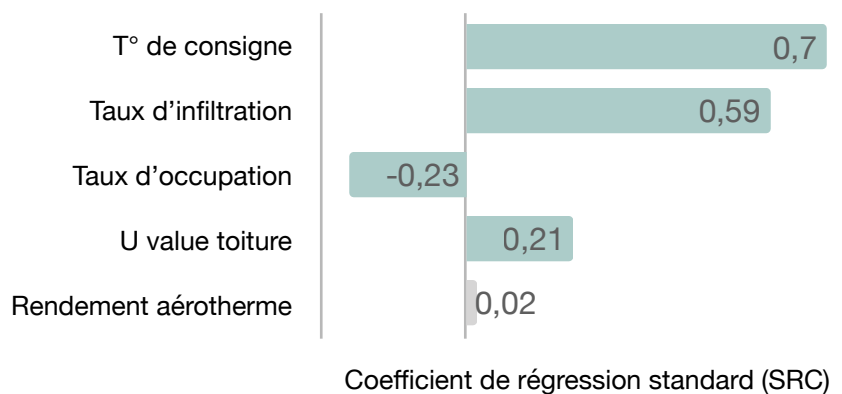


Figure 9.02 : Résultats de l'études de sensibilités à 500 itérations

A l'aide de ces résultats, il est déterminé que le paramètre le plus significatif, parmi ceux étudiés, vis-à-vis de la consommation énergétique du bâtiment, est la température de consigne de la salle. Suivent le taux d'infiltration, le taux d'occupation et l'isolation de la toiture. La valeur pour le rendement des aérothermes est toujours considérée non concluante. L'erreur standard associée à son étude est grande et amène à une valeur P de 0,19. Une telle valeur indique que la variable pourrait être éliminée du modèle sans que celui-ci ne soit significativement moins bon. La modification du rendement des aérothermes ne sera donc pas considérée comme une mesure prioritaire à considérer pour diminuer le besoin énergétique du bâtiment. Ceci ne signifie pas que la modification du rendement des aérothermes n'a pas d'impact sur la consommation totale mais bien que les autres paramètres considérés sont bien plus critiques que lui. Les autres

paramètres pourront ainsi consister en des pistes intéressantes à approfondir. Ils consistent également en les points qu'il conviendrait de vérifier en priorité par des mesures et observations sur site dans les travaux futurs pour assurer la fiabilité des résultats des simulations énergétiques.

9.4.2. Analyse de l'incertitude (UA)

En parallèle à l'analyse de la sensibilité, DesignBuilder réalise également une analyse de l'incertitude du modèle. Pour celle-ci, il se base sur les mêmes paramètres que pour l'analyse de sensibilité. Le résultat de l'analyse à 500 itérations est présenté à la *Figure 9.03*. Cette figure représente la distribution des résultats de consommation énergétique du cas d'étude observée sur les 500 simulations.

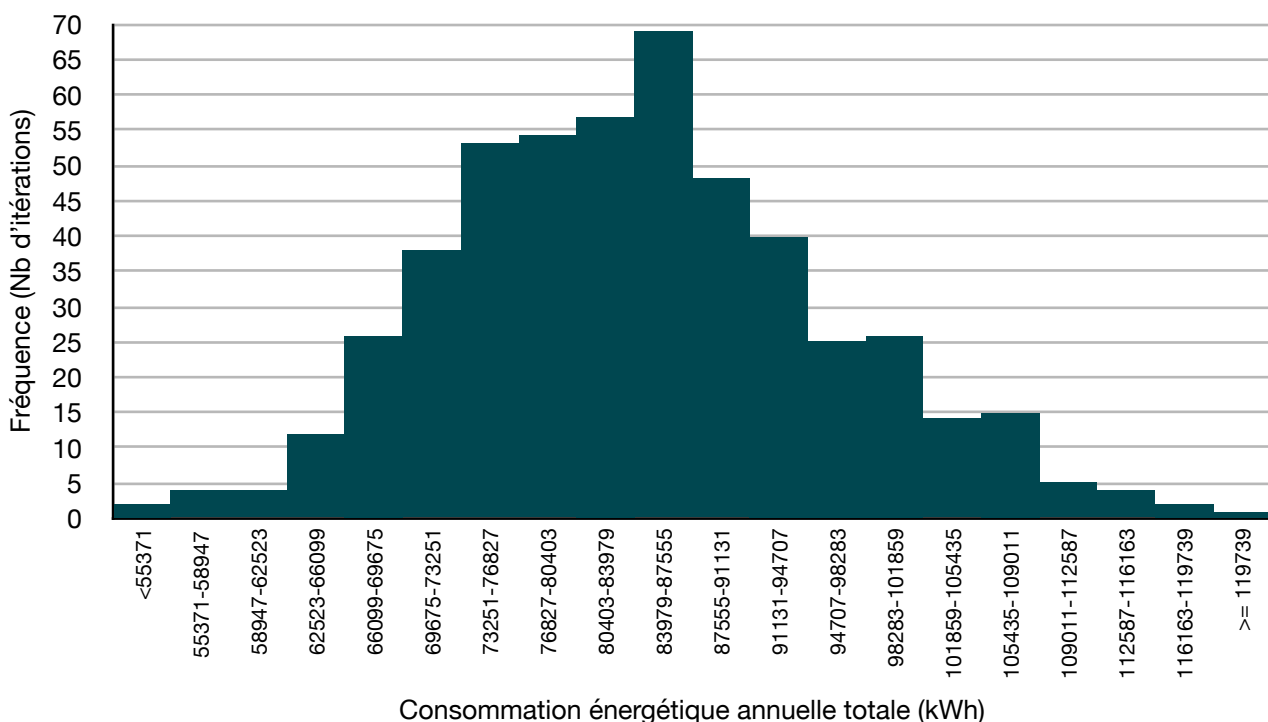


Figure 9.03 : Répartition des résultats énergétiques (500 itérations)

La valeur moyenne obtenue sur 500 itérations est de 84.339 kWh. Pour rappel, la quantité d'énergie retenue lors de la simulation du cas de base est: 84.746 kWh, soit une valeur très semblable. L'écart-type, égal à 11.791, représente 14% de la valeur moyenne. Étant en dessous de la barre des 15%, la modélisation est supposée suffisamment fiable que pour que ses résultats soient retenus.

Finalement, même si les résultats n'ont pu être validés de façon certaine, les études de sensibilité et d'incertitude permettent de les juger suffisamment fiables que pour qu'ils soient exploités dans le reste de ce travail. De plus, vu l'objectif de comparaison de ce travail, une incertitude rencontrée dans la modélisation impactera également la modélisation des scénarios d'une façon similaire. L'incertitude sur les résultats finaux de l'étude est donc faible.

10. Caractérisation des scénarios de l'étude

Ce chapitre se développe en deux temps. Dans un premier temps, une série de mesures à vocation environnementale est présentée. Le choix de ces mesures, qui seront dénommées "composants", est justifié et leurs caractéristiques techniques sont données. Elles seront par la suite combinées pour former les différents scénarios de l'étude. Ceci aura lieu dans la deuxième partie de cette section.

10.1. Choix des composants

A l'issue de l'analyse de sensibilité, quatre paramètres très influents sur la consommation énergétique totale du bâtiment ont été déterminés. Ceux-ci sont la température de consigne, le taux d'infiltration, le taux d'occupation et l'isolation des parois et, en particulier, celle du toit. Evidemment deux d'entre eux, la température de consigne et le taux d'occupation, ne peuvent être modifiés puisqu'ils ne sont pas relatifs au bâtiment mais à l'activité qu'il abrite et aux normes qui l'encadrent. Il reste donc la possibilité de jouer sur les deux autres pour faire baisser le besoin énergétique. Puisqu'ils sont tous deux relatifs à la construction des parois, étudier l'impact de nouvelles compositions pour celles-ci semble opportun.

Cependant, il est intéressant à ce moment de rappeler l'objectif de ce travail. Celui-ci n'est pas simplement de déterminer le scénario de modification du bâtiment qui permet les économies d'énergies les plus importantes mais bien ceux qui sont les plus avantageux aussi bien sur le plan environnemental que économique. Ainsi, la consommation énergétique n'est qu'un des facteurs influant sur les résultats de l'étude. L'utilisation d'énergie "verte", de matériaux bio-sourcés ou encore de systèmes à la longévité plus importante présente également un intérêt particulier qu'il est intéressant de considérer.

Le choix des composants qui seront étudiés se base sur les recommandations présentées lors de l'étude Step2Sport (2017), inscrites dans le guide wallon (2011) et sur des variations de celles-ci permettant de répondre pleinement aux objectifs. Il est intéressant de mentionner que selon l'étude européenne Ste2Sport, l'Europe pourrait atteindre ses objectifs de 2050 de -80% d'émissions de gaz à effet de serre en utilisant uniquement des systèmes et produits qui sont déjà sur le marché (Step2sport, 2015a).

Les différents composants seront choisis de sorte à représenter les différents "domaines" les plus pertinents: parois, implantation et système. Ce dernier sera également divisé en trois: chauffage, électricité et ventilation. L'étude se base sur la construction de nouvelles infrastructures et non sur leur rénovation. Une grande liberté dans le choix des composants existe donc.

Il est important de noter que deux solutions permettant de diminuer l'impact environnemental d'un bâtiment sont déjà intégrées ici. Elles auraient sinon pu faire partie des composants choisis. Celles-ci sont "optimiser la compacité du bâtiment" et "ajouter un récupérateur de chaleur sur la VMC". La compacité du bâtiment est en effet optimisée au maximum vis à vis des contraintes de dimensions propres à l'activité abritée et le système de ventilation est déjà équipé d'un échangeur de chaleur performant. Ces deux solutions étant d'application sur le bâtiment existant elles le seront également sur chacun des scénarios évalués.

Evidemment la capacité de DesignBuilder à simuler les composants choisis est primordiale afin de permettre leur étude. Ceux portant sur les parois ou l'implantation ne poseront pas de problèmes. Ceux portant sur les systèmes seront, eux, plus restrictifs. Ainsi des options comme l'ajout d'un puit canadien ou l'installation d'un système de cogénération, deux options recommandées par Step2Sport et le guide wallon, ont dû être rejetées car non supportée par le programme pour l'une et trop peu développée pour l'autre. Elles restent cependant des options valables qu'il serait intéressant de considérer dans de futures recherches.

Sur base de ces considérations, les composants ont été choisis. Ils sont repris à la *Table 10.01*.

Type	Code	Nom
Paroi	CP1	Toiture végétalisée
	CP2	(Sur-)isolation bio-sourcée
	CP3	Sur-isolation PIR
	CP4	Vitrages
Implantation	CI1	Enfouissement partiel
Système	CS1	Installation photovoltaïque
	CS2	Pompe à chaleur géothermique

Table 10.01 : Liste des composants étudiés

Ce sont donc ces sept composants qui seront par la suite combinés pour former les différents scénarios. Ces scénarios seront appliqués sur le cas d'étude. Pour rappel, ces derniers doivent se limiter à représenter un coût d'investissement supplémentaire égal à 15% du budget de construction du bâtiment existant. Des composants trop coûteux limiteraient donc les scénarios qu'il est possible de créer, excluant potentiellement des options intéressantes.

10.2. Description des composants

Les composants choisis vont être décrits dans cette section. La raison de leur choix, leurs caractéristiques techniques principales et leur impact attendu sur le bâtiment seront ainsi abordés. Pour les composants qui nécessitent une modélisation particulière dans DesignBuilder, celle-ci sera succinctement décrite. De plus, pour les composants dont le coût d'investissement était complexe à déterminer, à cause, par exemple, de plusieurs sources divergentes, il sera explicité. Pour les autres, les données exactes peuvent être retrouvées dans le fichier Excel en annexe.

10.2.1. CP1 - Toiture végétalisée

Lorsque l'on parle de bâtiments "verts", "écologiques", la première image qui vient en tête à beaucoup de personnes est celle de bâtiments couverts, en partie au moins, de végétation. Et en effet, l'ajout de parois végétalisées présente de nombreux avantages: amélioration de l'isolation thermique et acoustique, augmentation de l'inertie thermique, captation de CO₂, filtration de l'air, refroidissement naturel dû au phénomène d'évapotranspiration... (Vandooren, 2006). Bien que plusieurs de ces avantages ne concernent pas les indicateurs pris en compte dans cette étude, le choix d'implanter ce type de toiture est opportun et recommandé dans la littérature. Cette toiture végétalisée serait d'ailleurs obligatoire si le bâtiment était réalisé en région de Bruxelles capitale. La considérer est donc très intéressant dans ce travail. De plus, l'amélioration de la couche isolante en toiture a été désignée comme étant un paramètre très efficace lors de l'étude de sensibilité.

Pour les toits, trois types sont possibles: extensive, intensive et semi-intensive. C'est ce dernier type qui est considéré ici pour la transformation des 2.200m² de toiture en toiture végétalisée. Malgré le poids que représente la végétation et son substrat, l'installation d'une toiture végétalisée semi-intensive sur une toiture réalisée en panneaux sandwich est tout à fait réalisable. L'entreprise Isopan en réalise d'ailleurs à grande échelle via leur système "Green-roof". Celui-ci vient se placer directement par dessus leurs panneaux sandwich, sans besoin de renforcements de ceux-ci (Isopan, 2021). Seule l'étanchéité doit être contrôlée. Pour cette toiture semi-intensive, il est prévu 15cm de terre et 10cm de plantes.

De nombreuses études et publications ont déjà traité en profondeur des toitures végétalisées. Les travaux de Porsche et Köhler (2014) et de Kuronuma et al. (2018) seront par exemple utilisés pour déterminer leur impact environnemental (construction: 25 kg/m² CO₂e, captation: 2,5 kg/m²an carbone biogénique) et leur longévité (40ans). Pour ce cas d'étude, le coût d'investissement est estimé sur base du bordereau (UPA, 2020) et de la documentation de Bruxelles environnement (2021), à 140.000 € htva.

Pour la modélisation, DesignBuilder permet de simuler la présence d'une toiture végétalisée de façon avancée. Il prend notamment en compte la hauteur du substrat (15cm), son lambda (2 W/mK) et la hauteur des plantes (10cm). Une série de paramètres sont conservés égaux aux valeurs par défaut, ces paramètres comprennent l'émissivité et la réflexivité des plantes et la résistance stomatique.

10.2.2. CP2 - Isolation bio-sourcée

Comment comparer des approches à but environnemental sans considérer comme option l'amélioration de la couche isolante. Dans cette étude, les critères qu'il est cherché à optimiser sont, non seulement, la consommation d'énergie et le coût, pour lesquels une sur-isolation à base de produit issus de la filière pétrolière serait la plus avantageuse, mais également l'impact environnemental. Il est ainsi choisi dans ce travail, d'étudier deux cas de sur-isolation: une bio-sourcée en fibre de bois et une synthétique à base de polyisocyanurate (PIR).

CP2 concerne le premier cas. Les parois étant actuellement constituées de panneaux sandwichs, elles ne sont pas adaptées, en l'état, à l'ajout d'une épaisseur d'isolation. Leurs deux surfaces sont en effet déjà conçues comme étant les finitions intérieure et extérieure. Une nouvelle façon de les construire est donc nécessaire. Contrairement à la construction de base en panneaux sandwich, toutes les parois auront ici la même composition.

Les nouvelles parois étudiées sont ainsi composées de 16cm de panneaux de fibres de bois, fixés à un panneau de CLT et bardés à l'extérieur d'une tôle métallique. Celle-ci permet de conserver l'aspect du bâtiment de base et surtout de limiter les coûts. Ces parois remplaceront les parois actuellement réalisées en panneaux sandwich métalliques. Le sol reste, lui, inchangé tandis que le sous bassement gagne 1cm de PIR afin de ne pas devenir le maillon faible du bâtiment. Cette modification des parois entraîne également une modification du taux d'infiltration. Il est descendu à 6 m³/hm² comme le préconise Pfeifer (2020). Cette meilleure valeur est permise par l'étanchéité à l'air des panneaux CLT et au nombre limité de discontinuités entre eux (LTS, 2021). Ces joints sont de plus facilement colmatables à l'adhésif. Le détail de cette nouvelle paroi est présenté à la *Table 10.02*.

Parois et U values	Nom	Épaisseur	Lambda
Murs et toitures - 0,189 W/m²K	CLT	0,11 m	0,12 W/mK
	Panneaux fibres de bois	0,10 m	0,038 W/mK
	Panneaux fibres de bois	0,06 m	0,038 W/mK
	bardage métallique	0,001 m	50 W/mK
Sous-bassement - 0,19 W/m²K	Béton	0,10 m	1,7 W/mK
	Panneaux PIR	0,11 m	0,022 W/mK
	Béton	0,06 m	2,2 W/mK

Table 10.02 : CP2a - Sur-isolation bio-sourcée - détail des parois modifiées
(Sur base de Soprema, 2021 ; Pfeifer, 2020 et Unilin, 2021)

Pour l'isolant, les panneaux "Pavatherm" de la marque Pavatex ont été sélectionnés. Ils ont, en plus de leurs qualités environnementales, les avantages d'être résistants à la compression et de pouvoir être appliqués aussi bien en toiture qu'en

façade. Ils n'utilisent, de plus, également aucun produits dangereux pour la santé des occupants (Soprema, 2021).

Pour la structure en CLT sur laquelle l'isolant est fixé, le modèle choisi est une version en 3 couches de Pfeifer. Un des avantages du CLT est, outre son étanchéité à l'air dès trois couches, sa rapidité et facilité de mise en place, permettant une diminution des frais de main d'œuvre.

Une deuxième variante de ce composant sera également utilisée: une version ne cherchant pas à augmenter l'isolation du bâtiment mais à remplacer l'isolant PIR par un isolant bio-sourcé et ce pour une même valeur U (0,216 W/m²K). Le détail de cette nouvelle paroi, appliquée aussi bien aux murs qu'à la toiture, est repris à la *Table 10.03*. Le sous-bassement conservera son épaisseur initiale. Le taux d'infiltration sera par contre également amélioré vu la mise en œuvre du CLT.

Parois et U values	Nom	Épaisseur	Lambda
Murs et toitures - 0,216 W/m²K	CLT	0,11 m	0,12 W/mK
	Panneaux fibres de bois	0,14 m	0,038 W/mK
	bardage métallique	0,001 m	50 W/mK

Table 10.03 : CP2b - Isolation bio-sourcée - détail de la paroi modifiée
(Sur base de Soprema, 2021; Pfeifer, 2020 a)

10.2.3. CP3 - Sur-Isolation synthétique

Comme énoncé ci-dessus, le troisième composant paroi est une sur-isolation à base de polyisocyanurate. Pratiquement, il consiste en l'utilisation des mêmes panneaux sandwich que le cas de base mais avec une épaisseur augmentée de 20%. Les nouvelles valeurs de transmission thermique des parois sont reprises à la *Table 10.04*. Tout comme dans le composant CP2, l'épaisseur de l'isolant du sous bassement est également augmentée de 1cm, son U passe ainsi à 0,19.

Parois	U dans le cas d'étude	Modèle dans le cas d'étude	U avec le composant CP3	Modèle avec le composant CP3
Murs latéraux	0,22 W/m ² K	Jl wall 1150 10 cm	0,18 W/m ² K	Jl wall 1150 12 cm
Murs pignon	0,19 W/m ² K	Jl wall 1150 12 cm	0,15 W/m ² K	Jl wall 1150 14 cm
Toiture	0,21 W/m ² K	Jl roof 1000 10 cm	0,18 W/m ² K	Jl roof 1000 12 cm
Sous bassement	0,21 W/m ² K	/	0,19 W/m ² K	/

Table 10.04 : CP3 - Modification des parois
(Sur base de la fiche technique de Joriside (Joriside, 2021))

10.2.4. CP4 - Vitrage

Le dernier composant agissant sur les parois du bâtiment est la modification et l'ajout de surfaces vitrées. Ceci a pour but de permettre une ventilation naturelle à certaines périodes de l'année et de pouvoir se passer de l'éclairage artificiel lorsque suffisamment de lumière naturelle pénètre.

Le bandeau périphérique, très gourmand en châssis, est supprimé et remplacé par huit grandes ouvertures en polycarbonate en façade sud. Bien que la surface soit sensiblement inchangée (136 m² contre 137 m² avant) leur présence uniquement en façade sud et la diminution de 2/3 du nombre de mètres linéaires de châssis permettent de diminuer les transmissions thermiques. Ceci sera positif en hiver mais risquera de produire davantage de surchauffe en été. L'utilisation de polycarbonate blanc translucide permet la limitation de la surchauffe en été et de l'éblouissement des occupants par rapport à un vitrage classique. Les panneaux de polycarbonate utilisés présentent ainsi un facteur solaire de 0,28 pour une transmission lumineuse de 0,44 et une valeur U de 0,99 W/m²K (Brett martin, 2021).

Quatre exutoires de fumée en polycarbonate sont également ajoutés aux huit déjà présents sur le versant nord-est de la toiture. Ceux-ci permettront, en travaillant avec les nouvelles ouvertures sud-ouest, une ventilation naturelle efficace de l'espace.

Les surface vitrées étant plus nombreuses et placées plus en hauteur, elles permettent un éclairage naturel plus efficace et homogène que dans le cas de base. Un système de dimmage à 3 niveaux (Off, 50%, 100%) est ajouté à l'éclairage Led. Celui-ci permettra d'en limiter l'utilisation à ce qui est nécessaire pour combler les besoins.

Dans DesignBuilder, le recours à la ventilation naturelle est encodé comme suit. Elle est active durant les heures d'occupation de la salle lorsque la température extérieure est de minimum 17°C et qu'il ne pleut pas. La ventilation mécanique est alors interrompue durant ces périodes afin de permettre des économies.

Le système de contrôle de l'éclairage fait également l'objet d'un nouvel encodage. Pour permettre le dimmage, le niveau d'éclairage est évalué en permanence par le programme. Il est évalué au centre de la salle, dans sa partie basse entre les ouvertures et à 1,5m du sol. Cet emplacement a été sélectionné car il est le plus critique et la hauteur choisie permet d'assurer une bonne visibilité au niveau des barres de hauteur et des lattes des haies. Selon la valeur observée pour l'éclairage, les lampes adaptent leur intensité selon 3 niveaux pré-établis.

10.2.5. CI1 - Enfouissement

Puisqu'il est ici question de nouvelle construction et non de rénovation, considérer un composant relatif à l'implantation en tant que telle du bâtiment sur son terrain est opportun. Sa localisation étant fixée par le besoin d'être à proximité directe de la piste d'athlétisme extérieure existante et son orientation assez peu impactante au vu des

ouvertures du bâtiment, il a été décidé d'étudier l'impact qu'enterrer partiellement le bâtiment aurait. Ainsi ce composant consiste à enfouir du quart de sa hauteur la salle. Des pentes sont cependant aménagées pour donner accès aux issues de secours et à la porte de garage.

Enterrer le bâtiment induit le besoin de revoir la composition des parois qui se voient passer sous terre. Ainsi, la composition actuelle du sous-bassement est utilisée pour toute les parties en contact avec le sol. Elle est de plus épaissie de 10 cm de béton supplémentaire afin de reprendre les efforts de poussée des terres. La valeur U du mur en est donc légèrement impactée, passant à 0,208 W/m²K.

10.2.6. CS1 - Pompe à chaleur géothermique

Dans son étude, Step2sport met particulièrement en avant quatre solutions pour le chauffage du bâtiment: la co-génération, la géothermie, le recours à la biomasse et l'installation de panneaux solaires thermiques (Step2Sport, 2015b). Ce dernier est notamment utilisé pour la piste d'athlétisme intérieure de Mons en addition d'une chaudière gaz. Après discussion avec l'architecte/gestionnaire de l'infrastructure, il ressort que cet investissement n'était pas aussi intéressant qu'espéré au vu des consommations du bâtiment (très peu de besoin en eau chaude sanitaire) et leurs temporalités (Scailquin, 2020). Des trois restants, il est décidé de travailler sur la géothermie de par son intégration possible directement dans DesignBuilder et des gains envisageables, selon Step2Sport, les plus élevés des trois. Il s'agit de plus d'une technologie qui a déjà été jugée très performante par Nizetic (2018) pour les piscines publiques, il est donc intéressant de voir si elle est également adaptée à ce type d'infrastructure.

Un système géothermique est constitué de 3 parties: les capteurs géothermiques, la pompe à chaleur et le réseau de distribution.

- Pour la pompe à chaleur, le modèle choisi est la VWS 460 de Vaillant. Présentant une puissance thermique de 46kW (puissance frigorifique de 35,5kW) pour un COP de 5, il s'agit d'une option très performante capable d'assurer le chauffage de la salle.
- Au vu de la puissance assez importante, la dimension des échangeurs de chaleur dans le sol devra l'être aussi. Il a été choisi de travailler avec 14 puits verticaux de 75m. Ceux-ci ont été pré-dimensionnés via la méthode de Viessmann. Le nombre de mètres de puits nécessaire est donné par le quotient de la puissance frigorifique de la pompe à chaleur par la puissance d'extraction moyenne du sol (Viessmann, 2015). Pour cette dernière valeur, Viessmann conseille d'utiliser 35 W/m, une valeur courante.
- Pour la distribution de la chaleur, les aérothermes au gaz sont remplacés par des modèles à eau chaude de 11kW chacun, toujours de la même marque (Markclimate, 2014).

10.2.7. CS2 - Installation photovoltaïque

Un autre composant habituellement considéré lorsque l'on cherche à améliorer l'empreinte écologique d'un bâtiment est évidemment l'installation photovoltaïque. Ceci est également valable pour une infrastructure sportive comme suggéré par l'étude Step2Sport (2015b). Ce type de bâtiment se prête d'ailleurs particulièrement bien à ce genre de dispositif puisque la consommation électrique y est très stable tout au long de l'année et qu'elle s'opère majoritairement durant la journée lorsque la production a lieu.

Les panneaux utilisés sont les Viessmann Vitovolt 300. Le budget à investir varie fort selon les professionnels et la taille du système considéré. Selon le bordereau des prix unitaires de l'UPA (2020), il faut prévoir en moyenne 19.850€ HTVA pour 10 kWc. Il est cependant attendu, comme montré sur le site Wallonie énergie, que le prix par kWc baisse avec leur nombre. Ce site présente des estimations plus abordables: 14.000€ HTVA pour 10 kWc et 115.000€ HTVA pour 100 kWc (SPW, 2021). On voit qu'entre ces deux sources, un gros écart existe. Dans ce travail, une installation à 50kWc (324 m²) et une à 27,5 kWc (182 m²) sont prévues³¹. En considérant des estimations linéaires des valeurs du site wallon et la moyenne entre celles-ci et la valeur du bordereau, les coûts obtenus pour ces deux installations sont respectivement de 80.000€ et 44.275€. Ces prix sont hors taxes mais comprennent l'installation.

10.3. Description des scénarios

À partir des composants présentés au chapitre précédent, six scénarios ont été définis. Leur définition suit une série de critères permettant d'assurer leur pertinence vis-à-vis des objectifs du travail. Ces critères avaient été définis à la *Section 3. Méthodologie générale*. Ils sont de plus conçus de façon à permettre d'obtenir des réponses aux deuxième et troisième questions de recherche.

- *Investir dans les systèmes est-il plus rentable, économiquement et écologiquement, qu'investir dans les parois? Est-ce l'inverse? Ou est ce qu'un équilibre entre les deux est nécessaire?*
- *L'utilisation de matériaux bio-sourcés dans un hall sportif est-elle intéressante d'un point de vue économique et environnemental et pour le confort des usagers?*

Ainsi, sur les six scénarios étudiés, une partie ne comportera que des composants "parois", une autre que des composants "systèmes" et finalement une partie comprendra ces deux types. Deux scénarios seront également créés de sorte à être identiques, à l'exception du type d'isolant utilisé. L'un utilisera le composant isolant bio-sourcé tandis que l'autre, le composant PIR. Il sera de cette façon possible de comparer fiablement les impacts et gains possibles selon l'utilisation ou non de matériaux bio-sourcés dans le cas d'un hall sportif.

³¹ Dimensionnée sur base des consommations attendues dans les scénarios qui les comportent. Le dimensionnement a été réalisé à l'aide des facteurs de conversion kWc vers kWh publiés sur energieplus.be (energieplus, 2010) et des données reprises dans la fiche technique des panneaux (Viessmann, 2014).

Les différents scénarios créés sont présentés à la *Table 10.05*. Elle reprend pour chaque, le type auquel ils appartiennent (parois, système et composé), leurs identifiant et nom, les composants qu'ils mettent en œuvre et l'investissement total qu'ils représentent. Ce dernier consiste en le coût de construction du cas d'étude adapté selon les différents scénarios. Il est accompagné d'un indicateur reprenant l'augmentation d'investissement par rapport au cas d'étude³². Les choix de composition des différents scénarios sont justifiés succinctement à la suite de la table.

Type	Code	Nom	Composants	Investissement (tvac)	Écart
Base	B0	Cas d'étude	/	1.526.145 €	0 %
Paroi	P1	Toiture végétalisée	CP1	1.695.400 €	11 %
	P2	Sur-isolation bio-sourcée et vitrages	CP2a et CP4	1.723.277 €	13 %
	P3	Sur-isolation PIR et vitrages	CP3 et CP4	1.551.235 €	2 %
Système	S1	Installation photovoltaïque et pompe à chaleur	CS1 et CS2	1.667.330 €	9 %
Composé	C1	Isolation bio-sourcée et pompe à chaleur	CP2b et CS1	1.746.258 €	14 %
	C2	Installation photovoltaïque, vitrages et enfouissement	CS2, CP4 et CI1	1.758.112 €	15 %

Table 10.05 : Composition et coût des scénarios de l'étude

Le premier scénario "Parois" (P1) n'est composé que de la toiture végétalisée (CP1). Bien qu'il n'atteigne pas le maximum de 15% d'investissement supplémentaire, aucun autre composant ne lui est ajouté. Le but est d'ainsi évaluer les résultats qui auraient été observés si le cas d'étude avait été construit à l'identique en région Bruxelloise mais avec la toiture verte qui aurait alors été obligatoire sur la toiture plate.

Les scénarios P2 "Sur-isolation bio-sourcée et vitrages" et P3 "Sur-isolation PIR et vitrages" sont les deux prévus pour répondre à la troisième question de recherche. Leur composition est ainsi quasiment identique. Pour accompagner les composants de sur-isolation, c'est le composant vitrages qui a été sélectionné. Ce choix s'explique pour la raison suivante. En sur-isolant, il est attendu que la surchauffe augmente durant les périodes chaudes. Les échanges thermiques avec l'extérieur seront en effet diminués mais la production interne de chaleur conservée identique. L'ajout du composant vitrage permet ainsi une double réponse à ce phénomène. Tout d'abord, il permet une ventilation naturelle de part en part du bâtiment durant ces périodes de surchauffe, avec un taux de renouvellement d'air plus important que celui de la VMC. Deuxièmement, grâce à son ajout, le système éclairage devrait être moins utilisé, amenant à une plus faible quantité de gains internes. Un point d'autant plus important que les heures les plus chaudes sont généralement également très lumineuses.

³² L'écart est exprimé en % et est arrondi à l'unité.

Pour le scénario "Système" (S1 "Installation photovoltaïque et pompe à chaleur"), la composition choisie était directe. En effet, il recourt aux deux seuls composants "systèmes" considérés pour ce travail. La composition fait malgré tout beaucoup de sens. Les composants "pompe à chaleur géothermique" et "installation photovoltaïque" sont très complémentaires, l'un permettant la production électrique nécessaire au fonctionnement de l'autre. Il sera cependant intéressant de vérifier cet argument à partir des résultats qui seront obtenus. Les périodes de production et de consommation (chauffage, électricité et fonctionnement de la ventilation) de l'électricité risquant de ne pas être toujours aligné à cause de la périodicité du solaire³³.

Pour le premier scénario "Composé", il a été décidé de ré-utiliser le composant "Pompe à chaleur géothermique" et de le combiner au composant "isolation bio-sourcée". Il sera ainsi testé dans un cas avec un autre type d'isolation par rapport au scénario S1. Pour des raisons de coûts, le composant de sur-isolation bio-sourcée n'est pas utilisé mais bien le composant "isolation bio-sourcée" (CP2b). L'impact de l'utilisation de ce type d'isolant (et de la nouvelle composition de parois qui l'accompagne) sur les résultats du bâtiment pourra ainsi être déterminé dans le cas où il n'est pas accompagné du composant vitrages et de ses avantages.

Enfin, le dernier scénario est imaginé autour du composant CI1 "enfouissement". Il est accompagné d'un composant "Parois" et d'un "Système" pour compléter sa définition de scénario "Composé". Pour le premier, le composant "vitrages" est choisi par élimination. Les modifications des parois (CP2 et CP3) envisagées ne conviennent en effet pas aux parties enterrées et n'ont donc pas beaucoup d'intérêt dans ce cas où un quart des murs sont sous le niveau du sol. Pour le composant "Système", c'est le composant "installation photovoltaïque" qui est ré-utilisé. Ainsi l'utilisation des différents scénarios est assez équilibrée et les conclusions pourront être plus fiables.

Les différents scénarios qui seront étudiés dans la suite de ce travail sont ainsi définis et justifiés. Ils respectent tous l'augmentation maximale d'investissement de 15% (comme vu à la *Table 10.05*) et sont donc validés selon les critères mis en avant dans la méthodologie. Au nombre de six, ils permettront d'obtenir des réponses aux questions de recherche énoncées.

³³ Cet écart temporel entre production et consommation n'est, actuellement, pas un problème puisque l'injection du surplus sur le réseau est valorisée financièrement et que les gains environnementaux, bien que "fournis" au réseau, peuvent être comptabilisés dans l'ACV du bâtiment via le module D. Avec l'augmentation de la capacité de production photovoltaïque, ces affirmations pourraient évoluer à moyen terme (~10 ans).

11. Résultats - Consommation énergétique et confort des scénarios

Cette section va passer en revue les résultats en termes de confort et de consommation énergétique des différents scénarios. Elle commence par six premières sections dédiées à ceux-ci, une pour chaque scénario créé à la *Section 10. Caractérisation des scénarios de l'étude*. Au travers de ces sections, les valeurs des indicateurs de surchauffe sont notamment contrôlées. Les scénarios pourront ainsi être définitivement considérés adaptés à leur fonction si leur valeur est inférieure à la limite. Elle se conclut finalement par une section comparative. Dans cette dernière partie, les résultats obtenus pour les différents cas sont comparés au cas d'étude et entre eux à l'aide de graphiques récapitulatifs. Les avantages et inconvénients des différents scénarios vis-à-vis du confort et des consommations énergétiques y sont décrits

11.1. P1 - Énergie et confort - "Toiture végétalisée"

11.1.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 683 heures annuellement (+106h³⁴).
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 1051 Kh [Kelvin heure], soit 32% de plus que la valeur du cas d'étude. Bien qu'il ait été dit dans la section méthodologie que les scénarios devraient se situer sous la barre des 1000 Kh de surchauffe pour être validé, l'indicateur obtenu ici étant très proche de la limite, il est estimé que l'intérêt de tester l'ajout d'une toiture verte est supérieur à celui de considérer ce dépassement de 5% comme étant excessif.
- La surchauffe est en moyenne de 1,5°C durant les heures d'inconfort (+ 0,1°C).

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant acceptable, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.1.2. Consommation énergétique

- L'ajout de la toiture verte améliorant l'isolation de cette paroi et donc les déperditions thermiques au travers, la consommation de gaz pour le chauffage s'en trouve également diminuée. Le bâtiment consomme, avec ce scénario, 34.720 kWh de gaz naturel annuellement.

³⁴ Les valeurs entre parenthèse donnent la différence avec les mêmes valeurs obtenues pour le cas d'étude.

- Pour l'électricité, la valeur est sensiblement inchangée avec une consommation de 42.687 kWh.
- La répartition entre électricité et gaz de l'énergie totale consommée est présentée à la *Figure 11.01*.
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 35,18 kWh/m².

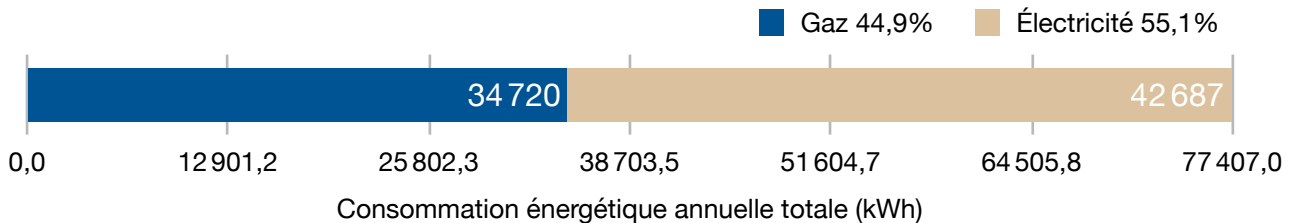


Figure 11.01 : P1 - Répartition de la consommation énergétique

11.2. P2 - Énergie et confort - "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages"

11.2.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 621 heures annuellement (+ 44h).
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 821 Kh, soit 3,4% de plus que la valeur du cas d'étude. Le scénario se situe bien sous la barre des 1000 Kh de surchauffe et peut donc être validé. De plus, bien qu'il soit supérieur à la valeur du cas d'étude, la différence entre les deux est faible (moins de 5%). Le scénario est donc jugé doublement adapté.
- La surchauffe est en moyenne de 1,3°C durant les heures d'inconfort (- 0,1°C).

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant adapté, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.2.2. Consommation énergétique

- Grâce à l'amélioration de l'isolation et au meilleur taux d'infiltration, la quantité de gaz nécessaire annuellement au chauffage du bâtiment a fortement diminué comparativement au bâtiment d'étude avec seulement 31.343 kWh nécessaires.
- D'un point de vue électricité, la diminution importante du besoin en éclairage et l'utilisation moins importante des ventilateurs de la VMC se marquent clairement sur la consommation: 26.903 kWh.
- La répartition entre électricité et gaz de l'énergie totale consommée est présentée à la *Figure 11.02*.
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 26,48 kWh/m².

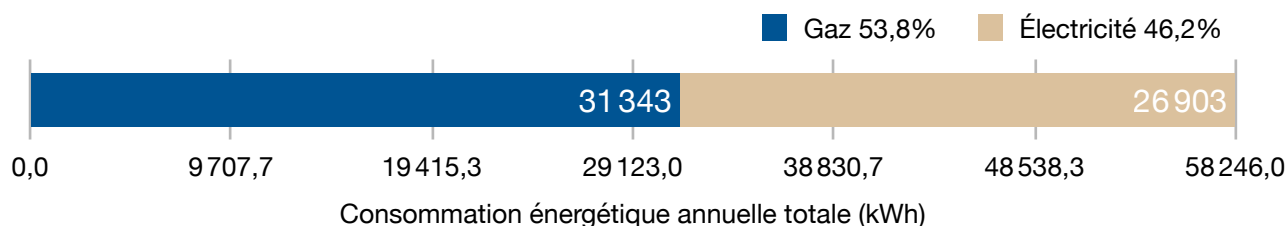


Figure 11.02 : P2 - Répartition de la consommation énergétique

11.3. P3 - Énergie et confort - "Sur-isolation PIR et vitrages"

11.3.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 525 heures annuellement (-52 h).
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 716 Kh, soit 10% de moins que la valeur du cas d'étude. Le scénario se situe bien sous la barre des 1000 Kh de surchauffe et peut donc être validé. De plus, il est inférieur à la valeur du cas d'étude. Utiliser ce scénario amène donc à une augmentation du confort, il est donc jugé doublement adapté.
- La surchauffe est en moyenne de 1,4°C durant les heures d'inconfort (+ 0°C).

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant adapté, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.3.2. Consommation énergétique

- A nouveau, la meilleure isolation a permis d'économiser du gaz en en faisant descendre la consommation annuelle à 34.375 kWh.
- Pour l'électricité, une valeur identique à celle du scénario précédant a été obtenue: 26.908 kWh.
- La répartition entre électricité et gaz de l'énergie totale consommée est présentée à la Figure 11.03.
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 27,86 kWh/m².

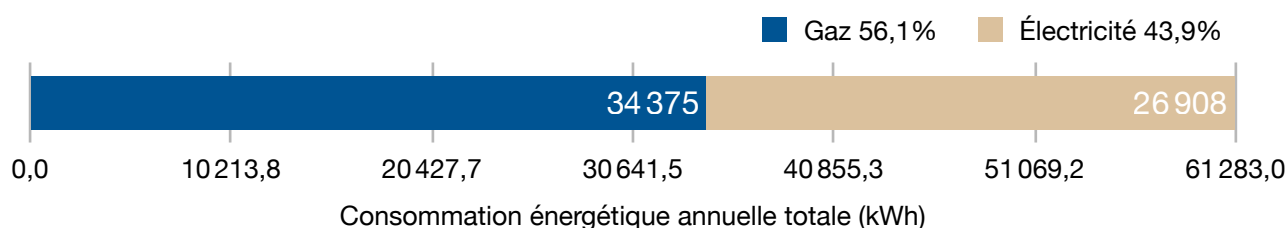


Figure 11.03 : P3 - Répartition de la consommation énergétique

11.4. S1 - Énergie et confort - "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque"

11.4.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 553 heures annuellement (- 24h).
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 768 Kh, soit 3,3% de moins que la valeur du cas d'étude. Le scénario se situe bien sous la barre des 1000 Kh de surchauffe et peut donc être validé. De plus, il est inférieur à la valeur du cas d'étude. Utiliser ce scénario amène donc à une augmentation du confort, il est donc jugé doublement adapté.
- La surchauffe est en moyenne de 1,4°C durant les heures d'inconfort (+ 0°C).

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant adapté, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.4.2. Consommation énergétique

- Vu le remplacement du système de chauffage gaz par une pompe à chaleur géothermique, l'énergie utilisée est maintenant électrique. Pour permettre le fonctionnement de la PAC, 10564 kWh d'électricité doivent être fournis.
- 42905 kWh d'électricité supplémentaire sont nécessaires pour alimenter l'éclairage, la vmc et les autres systèmes annexes.
- La répartition entre l'électricité utilisée pour le chauffage (via la PAC) et celle utilisée pour les autres postes (ventilation, éclairage,...) est présentée à la *Figure 11.04*.
- La consommation annuelle totale d'électricité est ainsi de 53.469 kWh tandis que les panneaux photovoltaïques en produisent 53.072 kWh.
- La production et la consommation n'étant pas toujours alignée et comme aucun de système de stockage n'est prévu, 26.885 kWh devront être prélevés sur le réseau tandis que 26.487 kWh y seront injectés.³⁵
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 27,86 kWh/m².

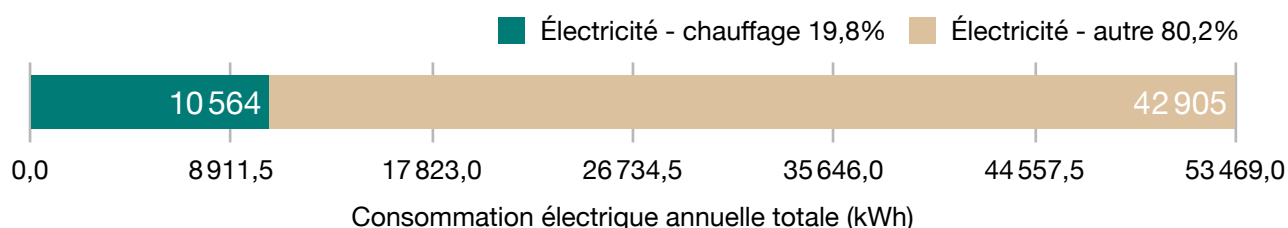


Figure 11.04 : S1 - Répartition de la consommation électrique

³⁵ Calculé via un bilan horaire production/consommation sur toute l'année d'étude via Excel.

11.5. C1 - Énergie et confort - "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur"

11.5.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 728 heures annuellement (+ 151h).
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 995 Kh, soit 25% de plus que la valeur du cas d'étude. Le scénario se situe à la limite des 1000 Kh de surchauffe et est donc validé de justesse. Il représente cependant une augmentation de l'inconfort et n'est donc pas optimal.
- La surchauffe est en moyenne de 1,4°C durant les heures d'inconfort (+ 0°C).

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant adapté, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.5.2. Consommation énergétique

- Vu le recours à une pompe à chaleur, l'énergie à fournir pour le chauffage est de l'électricité et non plus du gaz naturel. 8.582 kWh seront nécessaires.
- 42.647 kWh d'électricité supplémentaire sont nécessaires pour alimenter l'éclairage, la vmc et les autres systèmes annexes.
- La répartition entre l'électricité utilisée pour le chauffage (via la PAC) et celle utilisée pour les autres postes est présentée à la *Figure 11.05*.
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 23,29 kWh/m².

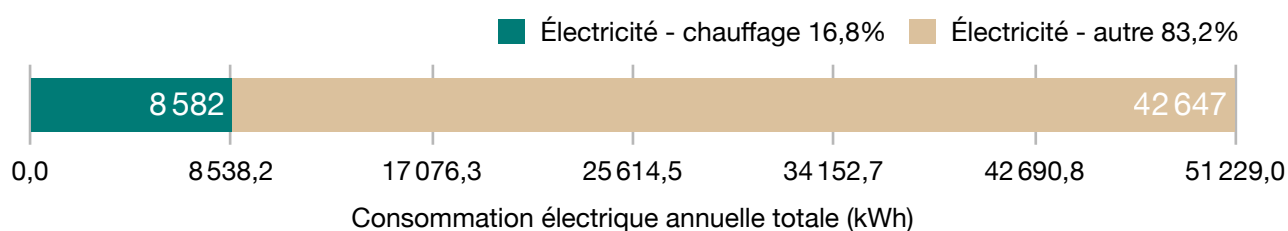


Figure 11.05 : C1 - Répartition de la consommation électrique

11.6. C2 - Énergie et confort - "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement"

11.6.1. Confort

Après export des résultats de la simulation et exploitation de ceux-ci dans Excel, les valeurs suivantes sont obtenues pour caractériser la surchauffe:

- Une surchauffe (température opérative supérieure à 21°C) est observée durant 350 heures annuellement (- 227h), soit une très forte diminution.
- L'indicateur de surchauffe pour le cas d'étude est de 436 Kh, soit 45% de moins que la valeur du cas d'étude. Le scénario se situe donc sous la barre des 1000 Kh de surchauffe et peut donc être validé. De plus, il est inférieur à la valeur du cas d'étude. Utiliser ce scénario amène donc à une augmentation du confort et il est donc jugé doublement adapté.
- La surchauffe est en moyenne de 1,2°C durant les heures d'inconfort (- 0,2°C). La baisse du nombre d'heures de surchauffe est donc accompagnée par une baisse également importante de l'écart de température durant ces heures.

Le scénario respectant le budget maximum et le niveau de confort étant adapté, sa pertinence est validée et ses résultats pris en compte.

11.6.2. Consommation énergétique

- Être partiellement enterré permet au bâtiment de diminuer ses pertes de chaleur au travers des parois en contact avec le sol résultant en une consommation abaissée de gaz naturel. Elle se porte dans ce cas à 33.055 kWh.
- La consommation électrique du bâtiment est bien plus basse que dans le cas d'étude grâce à l'ajout du composant vitrage. Elle est ici de 26.921 kWh.
- La répartition entre électricité et gaz de l'énergie totale consommée est présentée à la *Figure 11.06*.
- Grâce à l'installation de panneaux photovoltaïques, le bâtiment génère 29.777 kWh d'électricité dont il en revend 20.824 kWh sur le réseau. L'achat d'électricité se limite ainsi à 16.510 kWh.
- La densité de consommation énergétique annuelle est de 27,26 kWh/m².

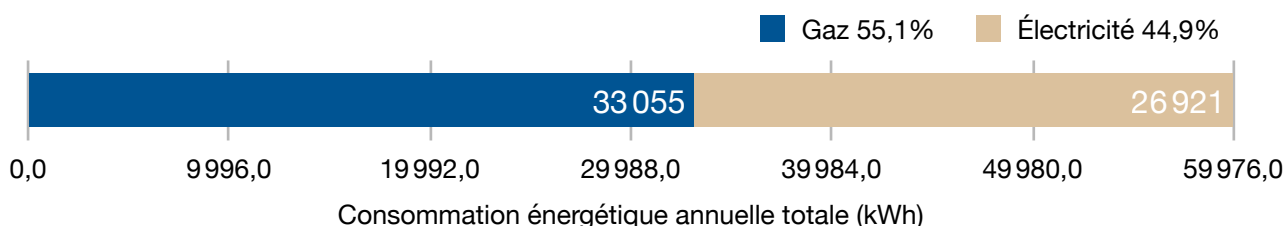


Figure 11.06 : C2 - Répartition de la consommation énergétique

11.7. Comparaison énergétique et du confort des scénarios

Maintenant que les différents résultats énergétiques et de surchauffe ont été obtenus, ils peuvent être comparés les uns aux autres afin de déterminer les solutions les plus avantageuses.

Pour aider à la comparaison, les résultats sont résumés à l'aide de deux graphes, aux Figures 11.07 et 11.08. Le premier concerne les consommations énergétiques tandis que le deuxième rappelle les périodes et indicateurs de surchauffe.

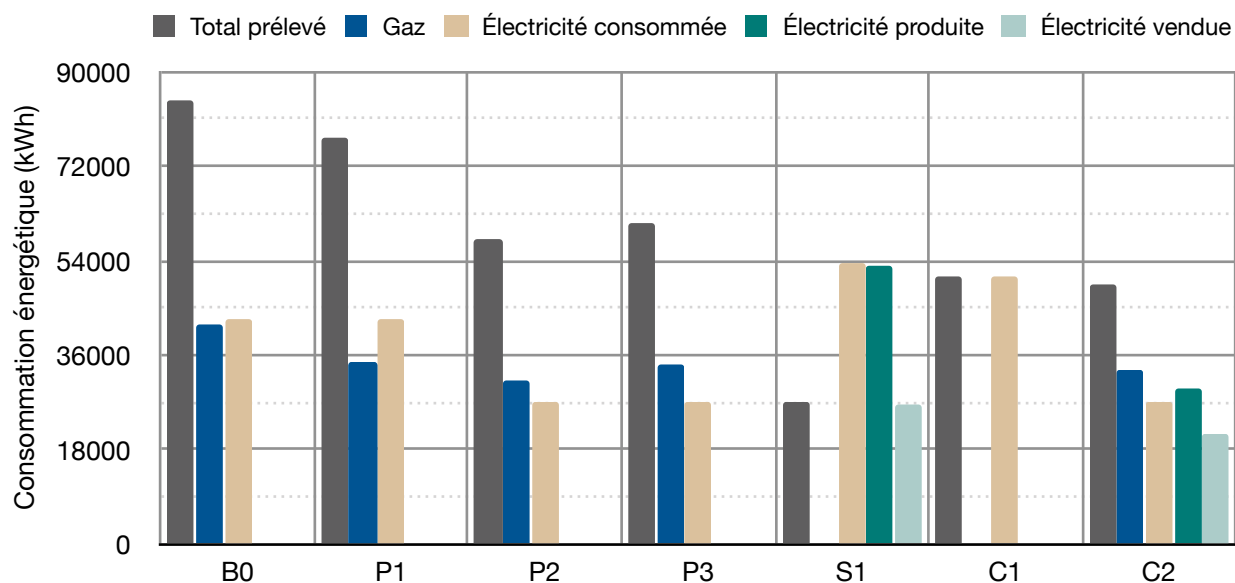


Figure 11.07 : Comparaison des consommations énergétiques des six scénarios et du cas d'étude

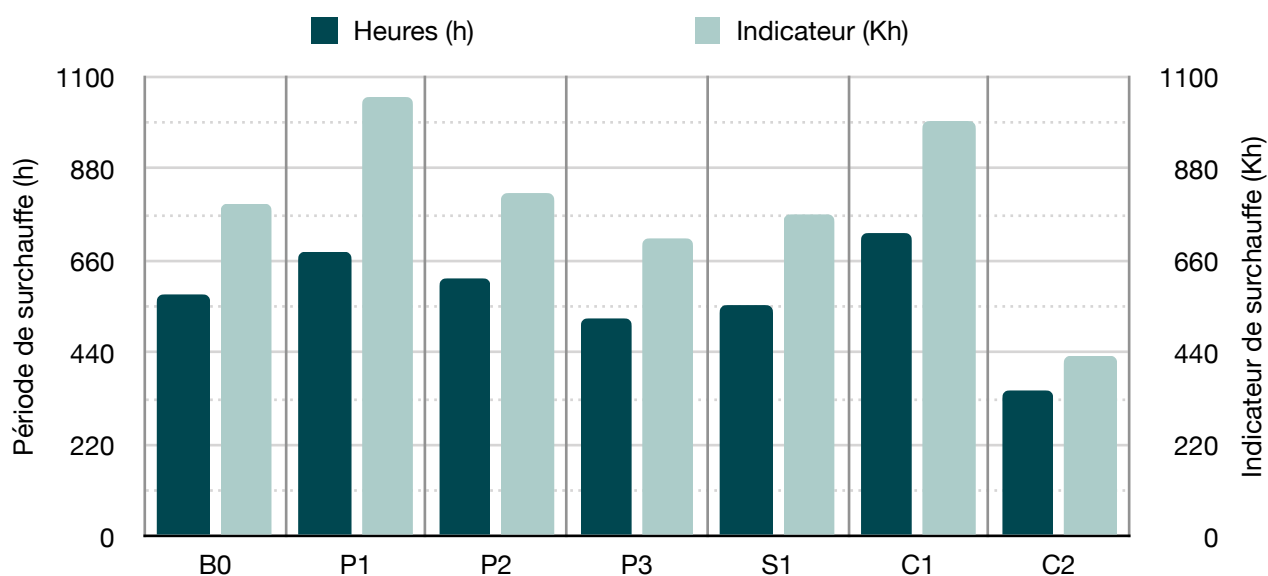


Figure 11.08 : Comparaison des résultats de surchauffe des six scénarios et du cas d'étude

Les constatations suivantes peuvent être énoncées à partir de ces graphiques:

- D'un point de vue énergétique, tous les scénarios présentent un total de kWh à prélever du réseau inférieur à celui du cas d'étude. Cela ne se traduira cependant pas forcément en économie et diminution de l'impact sur le réchauffement climatique (utilisation d'énergies plus polluantes ou plus chères mais en moindre quantité).
- Le scénario S1 "toiture végétalisée" est le moins demandeur au réseau. De plus, sa production équivaut à 99,3% de sa consommation. L'installation de batteries de capacité adéquate pourrait donc lui permettre de devenir quasiment autonome.
- Le scénario C2 "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" produit lui davantage d'électricité qu'il n'en consomme mais conserve le besoin d'acheter du gaz naturel (et de l'électricité lorsque la consommation n'est pas simultanée à la production).
- Les trois scénarios portant uniquement sur les parois (P1, P2 et P3) sont les trois qui diminuent le moins le total. Tandis que les deux avec pompes à chaleur se placent parmi les trois meilleurs.
- Il est constaté qu'investir dans une capacité de production d'énergie "gratuite" (géothermie et photovoltaïque) est plus intéressant pour faire diminuer la quantité totale d'énergie à prélever sur le réseau que d'investir dans la limitation de sa consommation, c'est à dire qu'en diminuant les coefficients de transmission thermique des parois.
- Ce dernier point est particulièrement visible en comparant les résultats de S1 "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque" et C1 "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur". Tous les deux utilisent une pompe à chaleur mais le premier investit le budget restant dans une production d'électricité tandis que le deuxième investit dans la limitation des pertes thermiques. Bien que les consommations électriques soient quasiment inchangées, la part à acheter sur le réseau est presque doublée.
- Ce constat concernant l'intérêt de produire l'énergie est également visible mais dans une moindre mesure en comparant les résultats de P2 "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages" et C1 "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur". Le premier mise tout son budget sur la limitation des pertes thermiques tandis que le deuxième mise lui en partie sur les parois et en partie sur le captage de la chaleur gratuite du sol.
- Les scénarios P2 et P3 qui consistent en une sur-isolation bio-sourcée pour le premier et chimique pour le deuxième présentent des résultats proches. L'avantage est à P2 grâce à la construction des parois qui permet une meilleure étanchéité à l'air et donc moins de pertes thermiques.
- D'un point de vue confort, la moitié des scénarios (P3, S1 et C2) amènent une amélioration des conditions d'environnement avec un nombre d'heures de surchauffe et surtout un indicateur de surchauffe inférieurs au cas d'étude. Deux autres (P2 et C1), présentent un plus gros inconfort que B0 mais conservent un indicateur inférieur à la limite énoncée. Seul P1 en dépasse la valeur maximale de 5%.
- Bien que le scénario C1 soit validé, il présente davantage d'heures d'inconfort que P1. Ceci est dû au dépassement moyen de température: P1 possède moins d'heures avec une température supérieure à 21°, mais quand elle l'est, elle peut l'être de beaucoup.

- A l'exception de ces scénarios C1 et P1 qui échangent de position, le même classement des cas est obtenu que ce soit à partir des heures de surchauffe ou à partir de l'indicateur qui soit considéré.
- Selon l'indicateur, le classement est, du plus confortable au moins confortable: C2, P3, S1, B0, P2, C1, P1.
- La position des trois derniers peut être expliquée par leur isolation/étanchéité. La chaleur entrante (gains solaires sur les vitrages) et produite à l'intérieur (gains internes métaboliques et gains internes de l'éclairage) est davantage bloquée dans la salle que dans les autres scénarios. Les parois sont en effet plus isolées (P2 et P1) et/ou plus étanches à l'air (P2 et C1).
- Les scénarios C2, P3 et S1 passent eux devant le cas d'étude grâce à différentes particularités: C2 est en partie enterré dans un sol à température plus basse que l'air ambiant, permettant un refroidissement; P3 limite la surchauffe durant les périodes non pluvieuses grâce à l'ouverture des fenêtres permettant une ventilation naturelle et S1, dont les valeurs sont très proches de celles du cas de base, présente une baisse des gains solaires grâce aux panneaux photovoltaïques occupant une partie de la toiture.

Finalement, les différents scénarios ont été validés sur base de leur investissement et de leur niveau de confort. Les résultats de leurs simulations dans DesignBuilder, présentés dans cette section, seront donc utilisés dans la suite de ce travail. Ils serviront en particulier pour l'évaluation des scénarios sur base du coût de leur cycle de vie et de leur impact sur le réchauffement climatique. Les résultats de ces évaluations sont présentés aux *Sections 12. Résultats - Analyse du coût du cycle de vie* et *13. Résultats - Analyse du cycle de vie*.

12. Résultats - Analyse du coût du cycle de vie

Les résultats des analyses du coût du cycle de vie du cas de base et des scénarios vont être présentés et commentés dans ce chapitre. Pour chaque cas, un graphique décrit la répartition du coût entre les différents domaines et postes. Ainsi, sur base de l'étude économique quatre domaines (coût initial, coût de remplacement, coût des procédures de maintenance et coût des consommations énergétique) et cinq postes (gaz, électricité, équipements techniques, structure et parois³⁶) ont été délimités. Ceux-ci ont été choisis de sorte à être aisément appréhendables sur des représentations graphiques. Les éléments pertinents à notifier à propos de l'impact financier des options retenues dans les différents scénarios sont ensuite discutés.

Les premiers résultats concernent la situation existante du cas d'étude tandis que les suivants traitent les scénarios. Pour ceux-ci, une mise en évidence préalable de leurs différences économiques par rapport au cas de base est réalisée.

12.1. ACCV du cas d'étude (B0)

12.1.1. Résultats sur les phases considérées du cycle de vie

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus pour la situation existante du cas d'étude sont présentés à la *Figure 12.01*. Quelques remarques sur ceux-ci sont également exprimées ci-dessous.

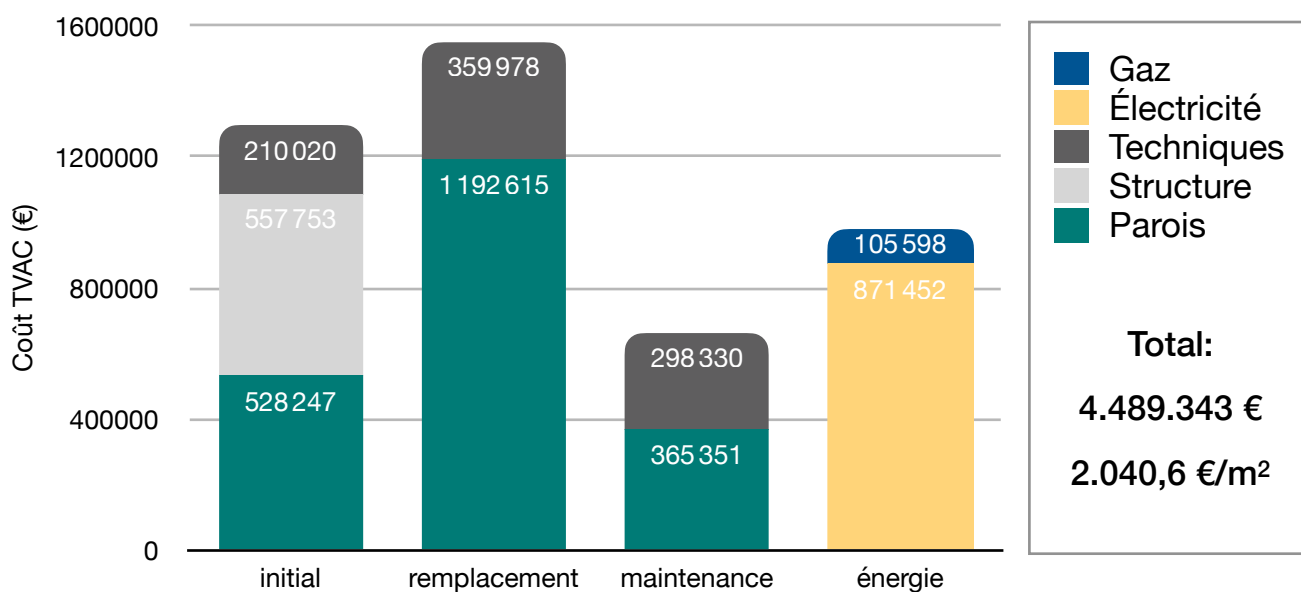


Figure 12.01 : Coût B0 - Cas d'étude

³⁶ La répartition des différents éléments constructifs entre les cinq postes est montré à l'Annexe 3

Un élément qui est directement remarqué dans ces résultats est la part très importante du coût des parois en comparaison aux autres domaines. Celle-ci s'explique par le prix du revêtement de sol de la salle. Avec une durée de vie de seulement 15 ans et un coût d'investissement initial de 70 €/m² qui passera à 100 €/m², conformément à la législation, pour les remplacements, la réalisation de ce sol est l'élément le plus coûteux de tous avec un total (actualisé) sur les 50 années du cycle de vie de 1.278.590 € tvac. C'est cependant une dépense obligatoire vu la fonction de la salle. De plus, l'utilisation de panneaux sandwich pour les murs et le toit consiste également en un investissement important à hauteur de 245.350 € tvac. Il est utile de noter que ce prix comprend la fourniture des panneaux selon les tarifs de leur fiche technique, la main d'œuvre nécessaire à leur installation (sur base de 0,4h/m²) mais aussi la réalisation des joints entre les panneaux et la pose de couvre-joints métalliques sur ceux-ci.

Sur les 4.489.343 euros globaux, deux tiers d'entre eux interviennent pendant l'exploitation. L'investissement initial ne consiste donc qu'en un tiers du montant financier à prévoir pour opérer une infrastructure de ce type sur 50 ans. Bien que les consommations électriques et de gaz soient à peu près égales en termes de kWh, l'impact économique de l'électricité est huit fois celui du gaz.

12.1.2. Résultats sur l'entièreté du cycle de vie

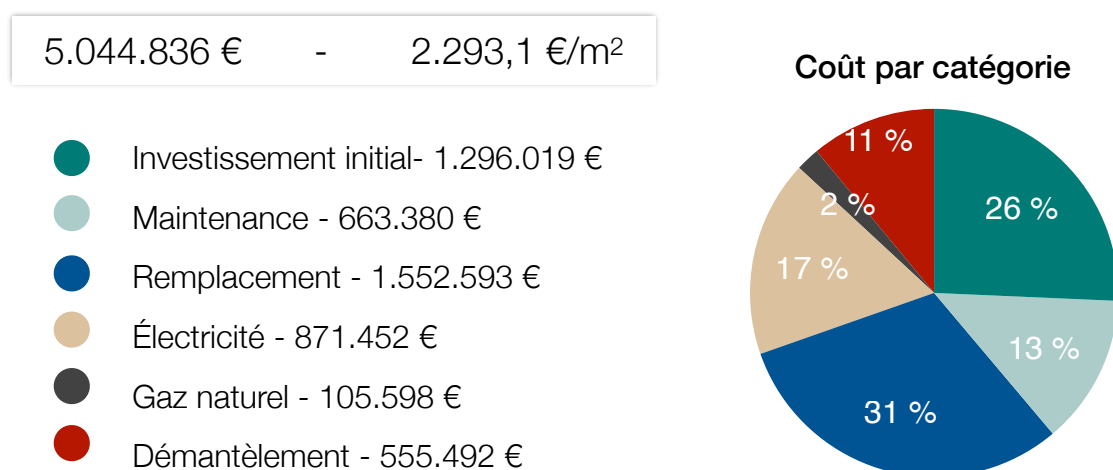


Figure 12.02 : Coût B0 - ACCV complète

Une version complète de l'analyse du coût du cycle de vie est réalisée pour le cas d'étude. Celle-ci reprend donc l'entièreté des coûts que la norme EN 15459 (2017) indique de considérer. Les coûts de démantèlement de l'infrastructure en fin de vie sont donc ajoutés. Ces résultats ne seront pas utilisés plus en profondeur dans ce travail mais pourront servir de base de comparaison pour de futures recherches sur le domaine. Ils sont présentés à la *Figure 12.02*.

L'ajout de ces coûts fait passer au bâtiment la barre des 5 millions d'euros sur 50 ans soit plus de 100.000 € si on les ramène à une base annuelle. Démanteler le bâtiment et assurer la gestion des déchets ainsi occasionnés équivaut, en terme de coûts, à environ 45% des frais d'investissement initiaux.

12.2. ACCV du scénario "Toiture végétalisée" (P1)

12.2.1. Particularités économiques du scénario

Le coût d'investissement nécessaire à la réalisation d'une toiture verte semi-intensive sur le bâtiment du cas d'étude est de 139.880 €. Ce type de parois ayant une durée de vie de 40 ans en moyenne (Porsche & Kohler, 2014), il est attendu de devoir, au début de la 41^e année, démanteler l'existante et aménager une nouvelle. La moitié du coût d'investissement peut être économisée en conservant une partie de l'ancienne toiture. Ce remplacement présente ainsi un coût actualisé de 136.720 €. De plus, ce type de toiture nécessite un entretien annuel dont le coût est estimé par Porsche et Kohler (2014) à 1,1% du coût d'investissement. Bien que ce ne soit pas pris en compte dans l'étude, le coût de démantèlement complet de la toiture verte représente, toujours selon ces auteurs, 20% de son coût de construction. L'utilisation d'une toiture verte intensive (au lieu de simplement semi-intensive) aurait été plus coûteuse notamment via le besoin plus important d'entretien et le besoin de renforcer la structure.

12.2.2. Résultats

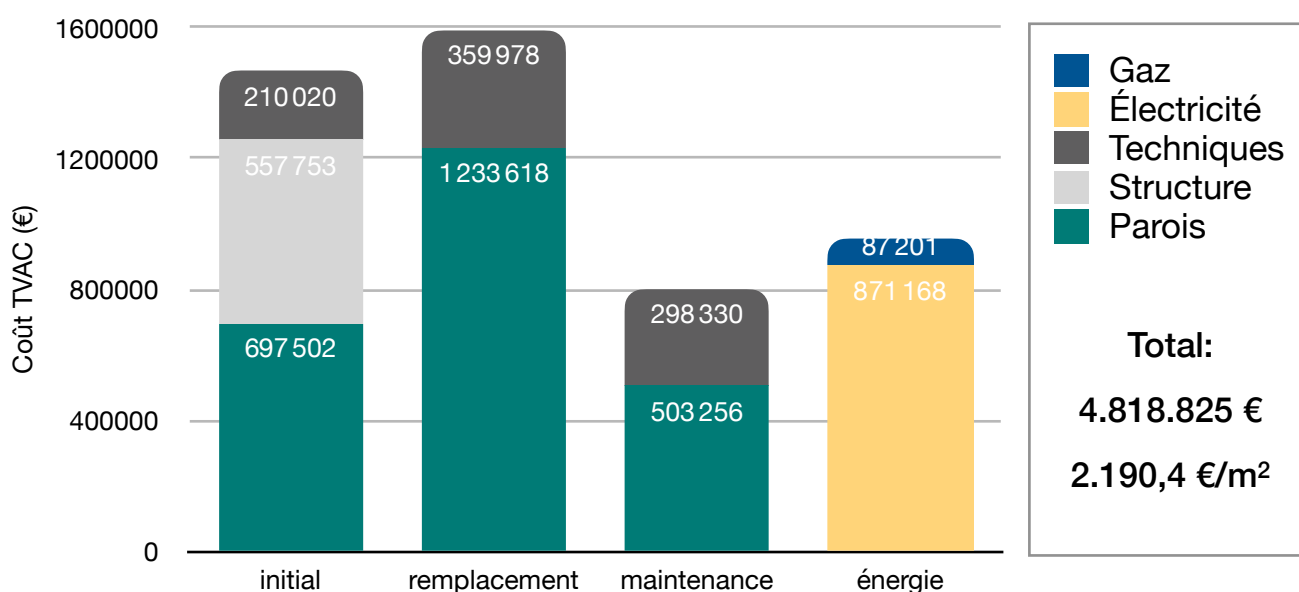


Figure 12.03 : Coût P1 - toiture végétalisée

Au vu des résultats (Figure 12.03), ce scénario n'est pas économiquement intéressant puisque l'augmentation de l'investissement initial de 11% n'est pas compensée sur la durée de l'étude. Le bâtiment obtient un coût global augmenté de 329.482 € (+7,3%) par rapport à la situation existante. La consommation d'énergie nécessaire au chauffage ayant été diminuée grâce à l'isolation supplémentaire apportée en toiture, une baisse du coût énergétique était attendue. Celle-ci est confirmée mais reste limitée à - 2%. Le prix du gaz étant faible comparé à celui de l'électricité, une baisse de la consommation de celui-ci sans changement au niveau électrique n'apporte pas de changement drastique.

12.3. ACCV du scénario "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages" (P2)

12.3.1. Particularités économiques du scénario

Les nouvelles parois composées de CLT, isolant en fibres de bois et bardage métallique, présentent une durée de vie identique à celle des panneaux sandwich, à savoir 50 ans. Elles ne devront donc pas être renouvelées durant la durée de l'étude. Le changement de composition entraîne un supplément de 161.000 €.

Les durées de vie des ouvertures en polycarbonate et des exutoires de toiture, ne changent pas mais les quantités de ces éléments étant plus importantes, les coûts d'investissement et de remplacement augmentent. De plus, l'éclairage artificiel étant moins utilisé, le remplacement des tubes LED interviendra moins fréquemment puisque le nombre d'heures possible d'utilisation sera moins vite atteint.

12.3.2. Résultats

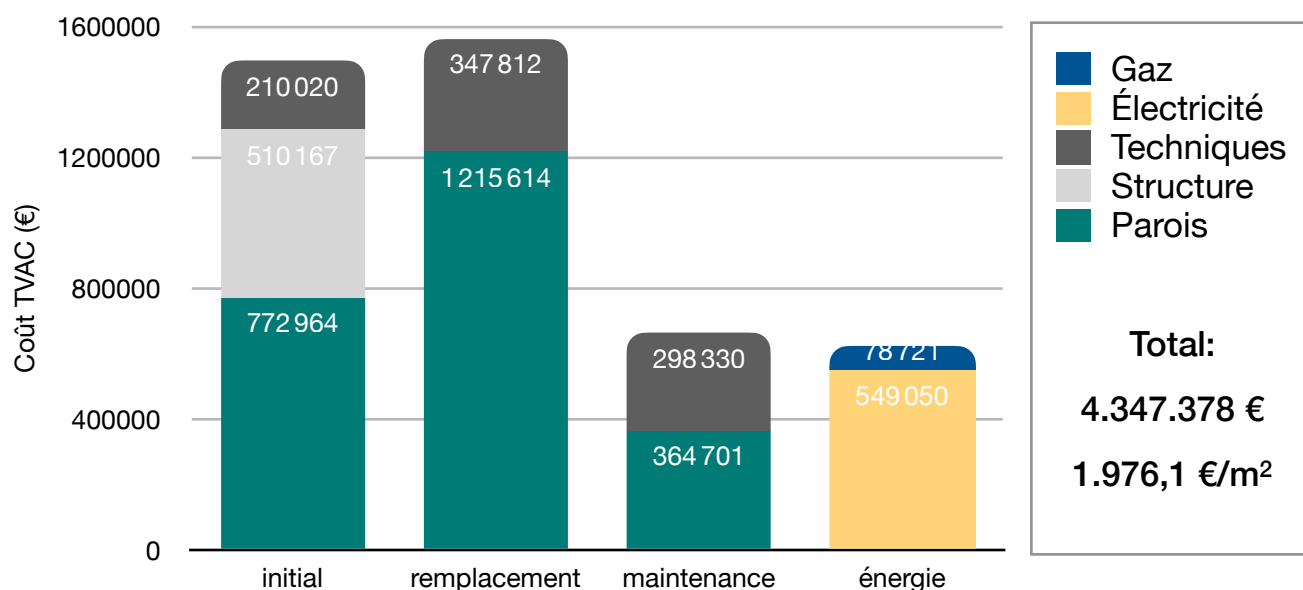


Figure 12.04 : Coût P2 - Sur-isolation bio-sourcée et vitrages

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus avec ce second scénario sont présentés à la *Figure 12.04*. Le pourcentage de 13% d'investissement initial supplémentaire (197.132 €) sert à améliorer l'isolation de la salle et rend possible une diminution forte du besoin d'éclairage. Cela permet une importante économie sur la facture énergétique de plus de 330.000 € (- 34%). Le coût global sur 50 ans en est ainsi positivement impacté avec une baisse de 141.965 € (- 3%), rendant ce scénario économiquement intéressant. Le coût au m² passe sous la barre des 2000 €.

12.4. ACCV du scénario "Sur-isolation PIR & vitrages" (P3)

12.4.1. Particularités économiques du scénario

Comme vu à la section précédente, le passage au modèle supérieur de panneaux sandwich entraîne un coût supplémentaire d'investissement de 18.850 €. Ce coût est assez limité comparé aux 161.000 € supplémentaires requis pour atteindre un niveau semblable de sur-isolation avec des parois en matériaux bio-sourcés comme mis en place au scénario P2 ci-dessus. Ce coût est uniquement dû à l'augmentation du prix des panneaux, puisque les frais d'installations, eux, ne changent pas étant calculés sur base du nombre de panneaux placés et que celui-ci ne change pas.

Pour la partie "vitrages" du scénario, les mêmes remarques que celles relatives au scénario P2 peuvent être dressées: les coûts d'investissement et de remplacement augmentent. De la même façon, la durée de vie de l'éclairage est augmentée.

12.4.2. Résultats

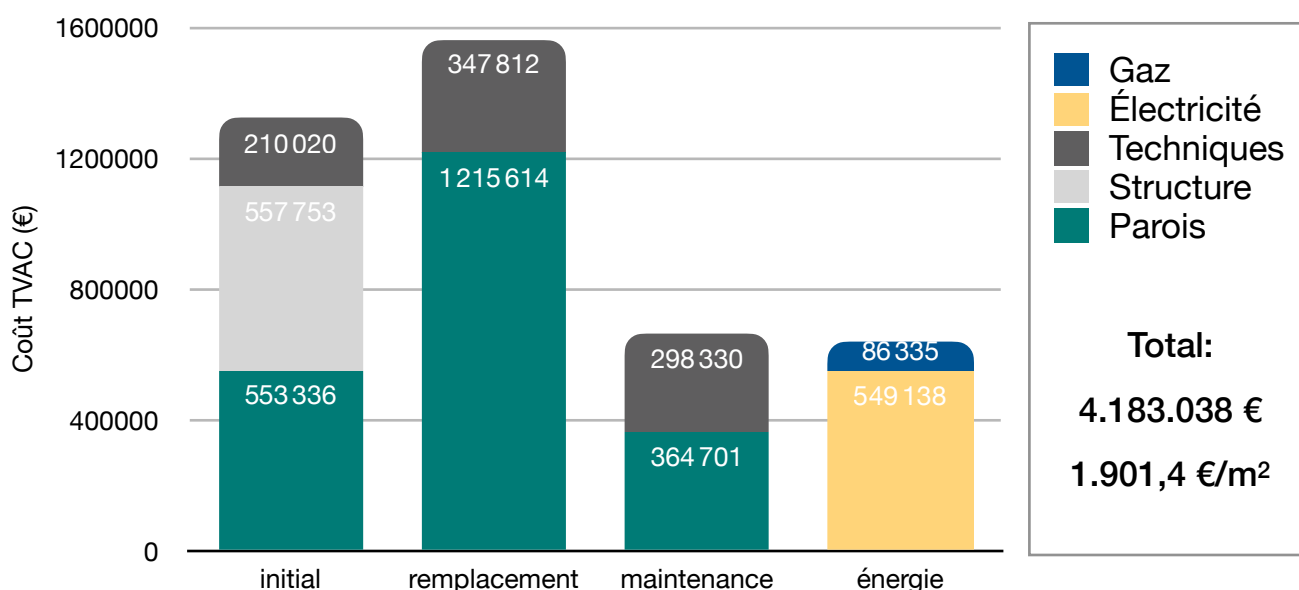


Figure 12.05 : Coût P3 - Sur-isolation PIR et vitrages

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus avec ce troisième scénario sont présentés à la *Figure 12.05*. Malgré l'investissement initial le moins augmenté des six scénarios avec seulement 25.090 € supplémentaires, ce cas parvient à faire diminuer le coût global sur 50 ans de plus de 300.000 € (-6,8%). Il présente un ratio de 12,2 € économisé par euro supplémentaire investi. La baisse est principalement due à la demande énergétique bien plus faible.

12.5. ACCV du scénario "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque" (S1)

12.5.1. Particularités économiques du scénario

Le changement du système d'émission de chaleur (remplacement des aérothermes à gaz par des aérothermes à eau) génère une économie de 23.000 € avec des frais annuels de maintenance toujours égaux à 3% de l'investissement. Cependant, le prix d'achat et le coût d'installation de la pompe à chaleur et des puits géothermiques, 60.000€, nécessaires à la production de chaleur pour le nouveau système d'émission annule ce gain.

Les puits géothermiques sont supposés avoir une durée de vie de 50 ans (et plus) tandis que la pompe à chaleur en tant que telle vivra 20 ans (EN 15459, 2017). La norme européenne prévoit également un coût de maintenance annuel équivalent à 3% du coût d'investissement pour cette pompe (EN 15459, 2017).

Les panneaux photovoltaïques devront être changés une fois sur la durée de l'étude puisque leur espérance de vie est de 30 ans. Les onduleurs, à changer tous les dix ans, le seront quatre fois. Pour la maintenance de l'installation, la norme conseille de considérer un coût annuel de 0,5% du prix de l'installation pour prendre en compte les inspections et les nettoyages éventuels.

12.5.2. Résultats

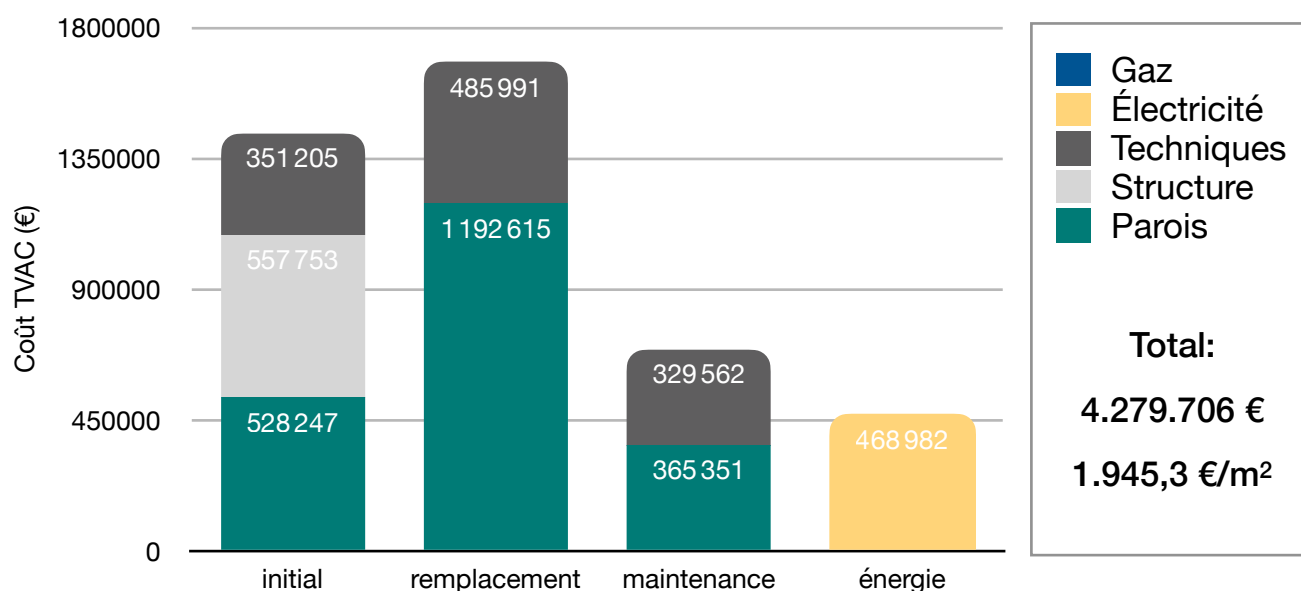


Figure 12.06 : Coût S1 - Pompe à chaleur et installation photovoltaïque

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus avec ce troisième scénario sont présentés à la *Figure 12.06*. En investissant 141.185 € (9% de l'investissement initial du cas de base) de plus dans les systèmes du bâtiment, un gain de près de 210.000 € (-4,7%) peut être obtenu sur une durée de 50 ans. La vente du surplus d'électricité

produite permet de générer 79.703 € contribuant à la rentabilité de ce scénario. La part de l'énergie dans le coût total est réduite de moitié par rapport au cas de base tandis que la part des techniques est la plus augmentée.

12.6.ACCV du scénario "Isolation bio-sourcée & pompe à chaleur" (C1)

12.6.1. Particularités économiques du scénario

Avec ses 220.113 € d'investissement initial supplémentaire, ce scénario est tout juste à la limite des 15% autorisés (+ 14,4 %). Les particularités liées à la modification de la composition des parois et à l'installation d'une pompe à chaleur ont déjà été énoncées ci-dessus pour les scénarios P2 et S1 et ne seront donc pas répétées³⁷.

12.6.2. Résultats

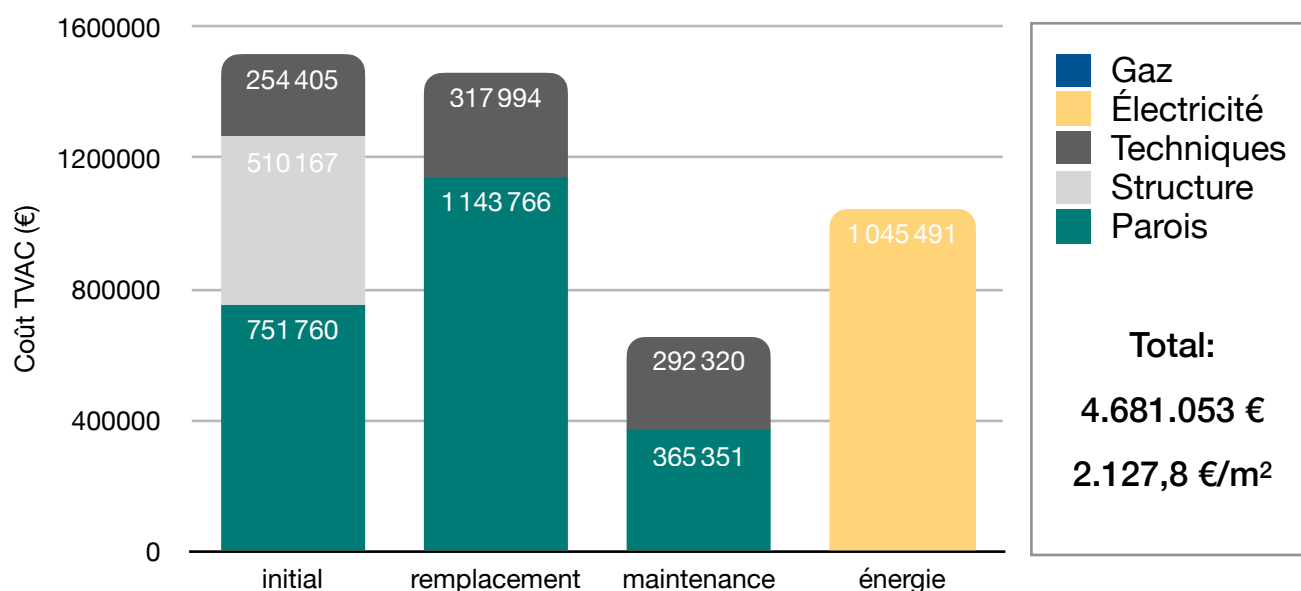


Figure 12.07 : Coût C1 - Isolation bio-sourcée et pompe à chaleur

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus avec ce troisième scénario sont présentés à la *Figure 12.07*. L'augmentation importante de l'investissement initial n'a pas permis de rendre ce scénario économiquement intéressant. Le coût global sur 50 ans est augmenté de 4,3% par rapport à celui du cas de base, indiquant que seuls 28.400 euros arriveront à être récupérés du supplément d'investissement. Ceci est dû en grande partie au coût de l'électricité bien plus important que celui du gaz. Bien que la quantité d'énergie à acheter ait baissé de plus de 1.675 MWh, le recours à l'électricité pour le chauffage (pour faire fonctionner la pompe à chaleur) et non plus au gaz entraîne des frais bien plus importants. Les frais arrivant en cours de cycle de vie hors énergie, à savoir les

³⁷ Une différence existe tout de même: la construction des parois revient 18.000€ moins cher que dans P2, vu l'épaisseur d'isolation légèrement diminuée.

frais de maintenance et de remplacement, sont moins importants que dans le cas de base.

12.7.ACCV du scénario "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" (C2)

12.7.1.Particularités économiques du scénario

Avec l'augmentation du volume de terre à excaver et à évacuer, les frais nécessaires à l'implantation du bâtiment deviennent plus importants de près de 90.000€. De plus, la proportion de surface réalisée en panneaux sandwich (peu coûteux) par rapport à celle en béton ("sous-bassement") est diminuée, les 2,6 premiers mètres étant maintenant réalisés en béton contre les premiers 60cm précédemment. Ceci induit une augmentation du coût. L'épaisseur du voile de béton mis en œuvre est également augmentée pour pouvoir reprendre l'effort de poussée du sol induisant des coûts encore plus importants en termes de matériaux et de main d'œuvre. Les frais liés à l'installation photovoltaïques et aux vitrages ont déjà été abordés ci-dessus, pour les scénarios P2 et S1.

12.7.2.Résultats

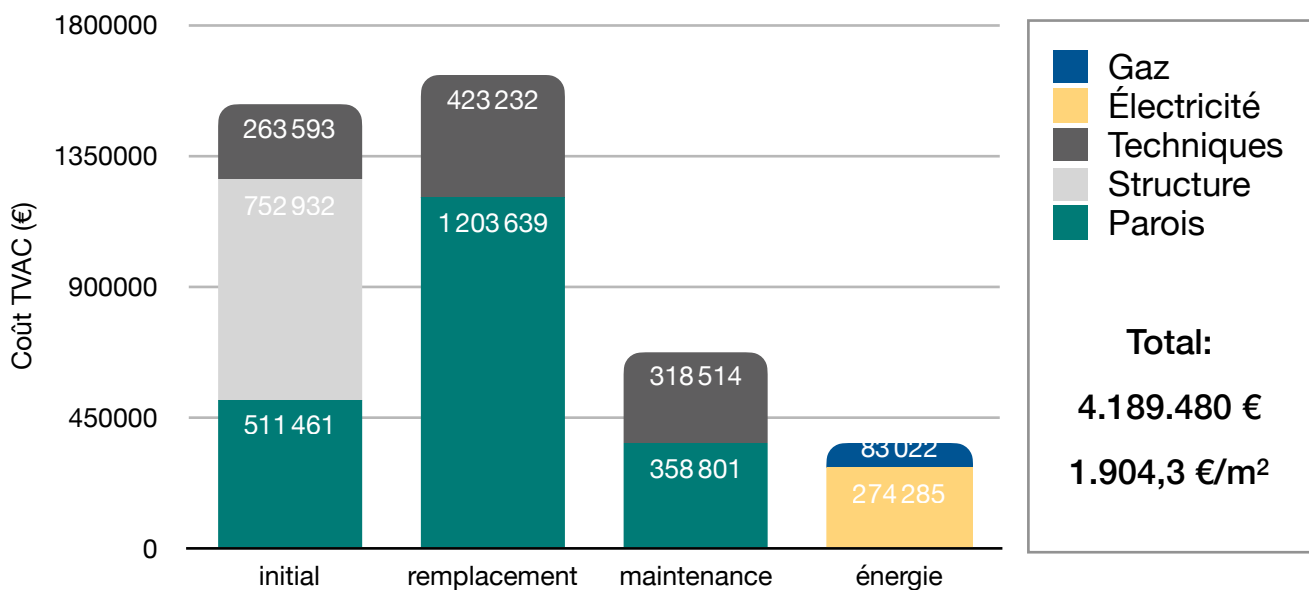


Figure 12.08 : Coût C2 - Installation photovoltaïque, enfouissement et vitrages

Les résultats de l'analyse du coût du cycle de vie obtenus avec ce troisième scénario sont présentés à la *Figure 12.08*. Ce dernier scénario permet, à partir d'un investissement important de 231.967 € (115% de l'investissement du cas B0), une économie tout aussi importante de 299.863 € sur la durée de vie. Ce scénario se marque principalement dans l'augmentation du coût de la structure qui, pour rappel, comprend également les frais liés au terrassement, et par la très grande baisse de la facture énergétique de pas moins de 63% par rapport au cas de base. Cette baisse du coût énergétique s'explique non seulement par la diminution du besoin de chauffage lié à l'enfouissement partiel du

bâtiment mais également, et surtout, par l'utilisation moins importante d'éclairage artificiel dans la salle grâce au système de dimmage couplé à l'apport de lumière naturelle. De plus, la vente de l'électricité photovoltaïque excédentaire rapporte 62.659 €.

12.8. Conclusion de l'étude économique

Pour conclure cette section relative aux analyses du coût du cycle de vie, les différents résultats obtenus sont comparés les uns aux autres. Les solutions les plus avantageuses d'un point de vue économique seront ainsi déterminées.

Mais avant tout, il est important de rappeler que le critère prioritaire utilisé lors de la conception des scénarios était de rendre le bâtiment plus durable écologiquement (sustainable), le critère de la limitation des coûts n'arrivant que deuxième. La limitation du coût a surtout pour but d'assurer que les investisseurs s'y retrouvent en se voyant offrir l'option qui allierait avantage écologique et financier de la façon la plus optimale. De plus, les investisseurs seront plus enclins à rendre leur projet plus écologique si cela peut leur amener un gain financier.

Ainsi, puisque les différentes options n'ont pas été conçues dans le but unique de diminuer les coûts du bâtiment, il est normal que la différence entre le coût global des différents scénarios et celui du cas de base ne soit pas aussi fortement marquée que celle observée concernant le CO₂. Le bâtiment de base est, de plus, déjà construit selon un procédé très économique alliant préfabrication et panneaux aux dimensions standardisées. Optimiser davantage son coût de revient est donc complexe, d'autant plus lorsque cet objectif doit être combiné à une démarche écologique.

La comparaison des coûts est facilitée par l'analyse des deux graphiques présentés ci-dessous. Le premier, à la *Figure 12.09*, met en perspective les résultats totaux obtenus pour les différents scénarios et le cas de base. Afin de mieux discerner les avantages et désavantages réels des scénarios, un deuxième graphique est proposé à la *Figure 12.10*. Celui-ci représente la différence entre les valeurs du cas de base et celles des scénarios étudiés. Une valeur positive représente donc un surcoût de l'option analysée par rapport à la situation existante et inversement.

À noter que pour ces deux graphiques, les valeurs des coûts de remplacement et des coûts de maintenance ont été agrégées afin de représenter, en une seule valeur, la somme totale à prévoir pour les différentes opérations qui sont nécessaires durant la durée du cycle de vie.

Différentes constatations portant sur la comparaison des résultats sont reprises à la suite des figures, en fin de chapitre.

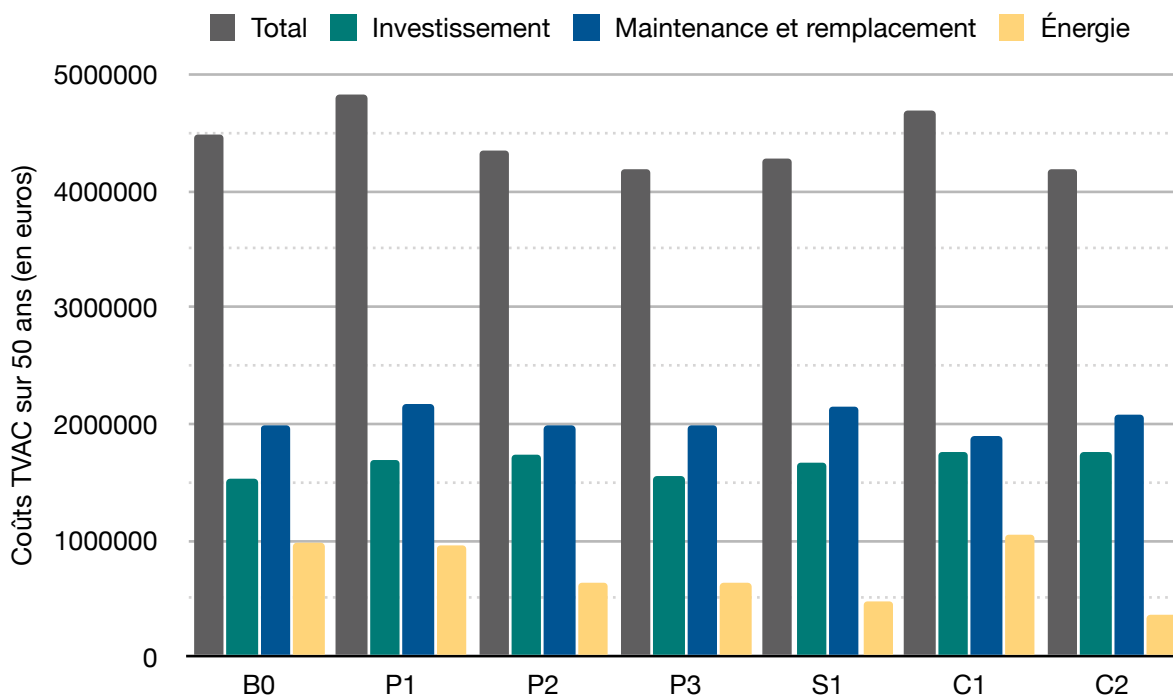


Figure 12.09 : Comparaison des coûts globaux

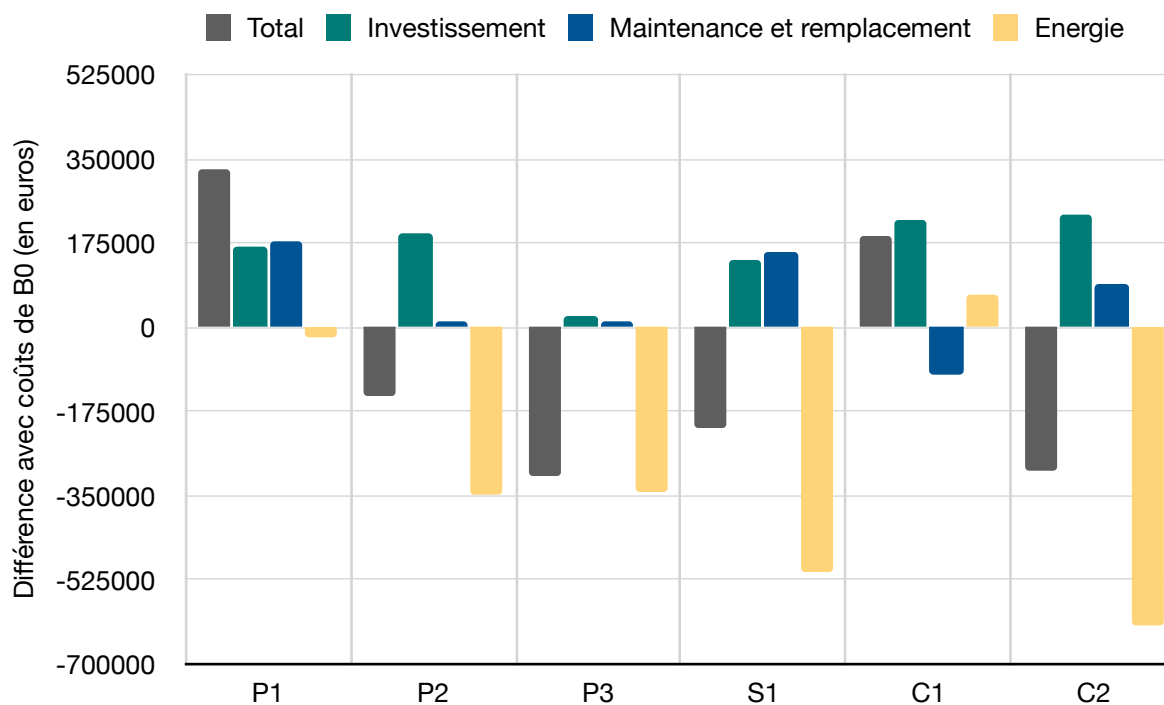


Figure 12.10 : Comparaison des différences entre coûts des scénarios et du cas de base

- Comme visible sur la *Figure 12.09*, la répartition du coût global entre les différents types de coûts considérés est très similaire entre chacun des scénarios ainsi qu'avec le cas d'étude. De manière systématique (même si l'importance relative varie un peu), c'est le coût de la maintenance et du remplacement qui représente la part la plus importante du coût global. C'est ensuite l'investissement initial qui entre en jeu.
- Sur les six scénarios, quatre seulement sont rentables. Les scénarios P1 et C1 malgré des investissements similaires aux autres scénarios et des gains dans au moins un domaine (énergie pour P1 et maintenance et remplacement pour C1) ne parviennent pas à atteindre un état plus économique que le cas de base.
- Les scénarios rentables sont, du plus au moins rentable, P3, C2, S1 et P2.
- Un élément constant entre chacun des quatre scénarios rentables est le gain très important réalisé sur le coût de l'énergie. Mais celui-ci ne suffit pas à classer les options par ordre de rentabilité. Des quatre, P3 est le plus économique malgré ses gains les plus faibles dans la catégorie "Énergie". De plus, P2 présentant des gains énergétiques très proches de ceux de P3 est lui classé le moins rentable des quatre.
- Il est remarqué que le choix des composants intégrés dans les scénarios est plus important que le coût supplémentaire investi. En effet, le scénario amenant les plus grandes économies est celui qui a été le moins coûteux à mettre en œuvre juste devant le plus cher d'entre eux. Le deuxième plus coûteux fait lui partie des scénarios non rentables, indiquant bien qu'il ne suffit pas d'investir une somme donnée dans des options écologiques pour obtenir un gain financier mais que le choix et l'étude des options et de leurs caractéristiques sont essentiels.
- Par ailleurs, dans les deux scénarios les plus économiques, la modification des vitrages est en application. Dans le deuxième et le troisième, l'installation photovoltaïque permet de belles économies. Ces deux composants ont donc un intérêt particulier à retenir, au minimum d'un point de vue économique.
- Au vu des résultats des scénarios P2, S1 et C1, une explication probable aux mauvaises performances de C1 est d'avoir installé une pompe à chaleur sans l'avoir couplée à une production d'électricité. L'augmentation de consommation électrique et le tarif élevé de celle-ci ne sont pas compensés par la suppression de l'achat de gaz naturel.
- Les options P2 et P3 ont l'avantage d'avoir les coûts de maintenance et de remplacement les plus faibles (des options rentables), limitant l'impact qu'aurait sur eux une brusque augmentation des prix du secteur de la construction, tandis que S1 et C2 ont eux les plus faibles coûts énergétiques théoriques les rendant moins sensibles à une augmentation potentielle imprévue de ces coûts.

13. Résultats - Analyse du cycle de vie

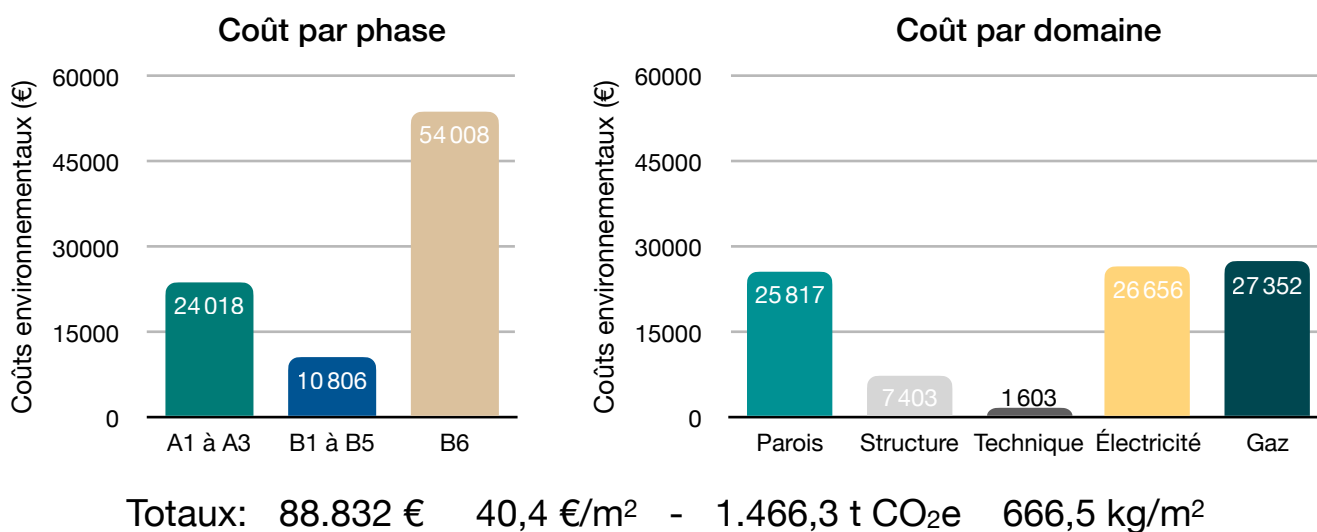
Dans cette section, les résultats de la monétisation des analyses du cycle de vie de la situation existante du cas d'étude et des différents scénarios sont présentés et comparés. Les analyses portent sur les modules A₁ à A₃ et B₁ à B₆ et considèrent l'indicateur de réchauffement climatique. Les modules B sont évalués sur une période de 50 ans. De plus, une étude de la sensibilité est réalisée sur le choix du facteur de conversion énergie/émissions de CO₂e.

Comme c'était le cas pour les résultats des analyses des ACCV, des graphiques reprennent, pour chaque cas étudié, les différentes contributions au coût écologique. Ensuite, les éléments pertinents à notifier à propos de l'impact sur le réchauffement climatique des options retenues dans les différents scénarios sont discutés.

Les premiers résultats concernent la situation existante du cas d'étude tandis que les suivants traitent les scénarios. Pour ceux-ci, une mise en évidence préalable de leurs différences environnementales par rapport au cas de base est réalisée.

13.1. ACV du cas d'étude (B0)

Les résultats de l'analyse du cycle de vie obtenus pour la situation existante du cas d'étude (B0) sont présentés, monétisés, à la *Figure 13.01*. Quelques remarques et constatations sur ceux-ci sont exprimées à la suite.



NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.01 : GWP monétisé - Cas d'étude

À 46,9 kg de CO₂e par m², les panneaux sandwich PIR représentent une contribution importante à l'impact environnemental (EMB, 2017). Avec un total de 188 tonnes, ils occasionnent des frais environnementaux de 9.400€ comptabilisés dans le domaine "Parois".

L'autre contributeur majeur est le revêtement de sol. Sa réalisation initiale (comptabilisée dans les modules A) produit 98.406 kg de CO₂e et requiert donc une compensation de 4.920 €. Ce niveau important d'émission est dû à la matière de ce revêtement: du polyuréthane. Par chance pour l'environnement, une fois sa durée de vie de 15 ans écoulée, son remplacement ne pourra se faire à l'identique. En effet, les nouvelles législations ne permettent plus l'utilisation d'un procédé aussi polluant. Le remplacement devra donc se faire avec une piste en caoutchouc vulcanisé, plus coûteuse mais moins émissive. Chaque remplacement "coûte" désormais 57.750 kg de CO₂e, soit 58,7 % de la réalisation originale. Avec une durée de vie toujours égale à 15 ans, les remplacements coûteront, au total, 8.829 €, amenant la contribution financière du sol sur les 50 ans à 13.749 €.

Dans ce cas d'étude, le domaine le plus important est clairement l'énergie avec une valeur doublement plus importante que le second domaine le plus émetteur de CO₂e, les parois. La structure et les systèmes présentent des valeurs basses en comparaison. Ceci peut paraître étonnant pour la structure vu les 850 m³ de béton et les 25 tonnes d'acier mis en œuvre. Mais cela s'explique par la durée de vie du béton. Encodée à 100 ans suivant la valeur recommandée dans la norme EN 15459, toutes les quantités de CO₂e calculées à l'aide de la base de données ICE, sont divisées par 2 afin de les ramener à la durée de l'étude (50 ans). Ceci suit le même principe que le calcul des valeurs résiduelles en fin de vie dans l'analyse de coût. Le but est, comme mentionné dans la section méthodologie, d'assurer une cohérence entre les deux études.

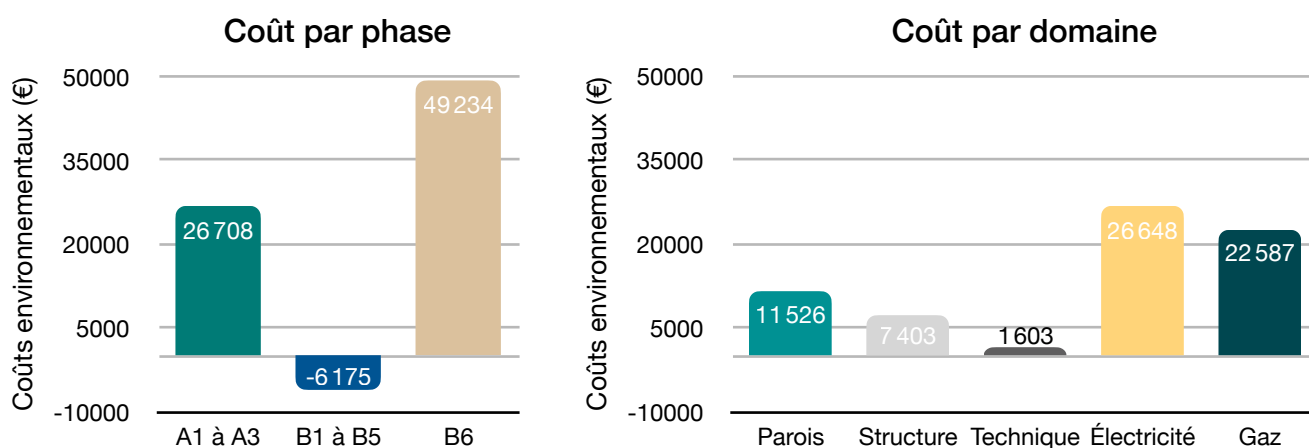
Contrairement à l'étude de coût, les remplacements et opérations de maintenance, arrivant durant le cycle de vie, sont moins impactants que ne le sont les contributions initiales (investissement et modules A).

13.2. ACV du scénario "Toiture végétalisée" (P1)

13.2.1. Particularités économiques du scénario

La création d'une toiture végétalisée provoque l'émission de 25 kg de CO₂e par m² selon les travaux de Kuronuma et al. (2014). Avec une durée de vie de 40 ans et 2200 mètres carrés à couvrir, ce sont 64.560 kg de CO₂e qui sont à prévoir. Cependant, une telle toiture, étant recouverte de végétaux réalisant la photosynthèse, capte du dioxyde de carbone de l'atmosphère pour croître. Cette captation est également estimée par Kuronuma et al. (2014). Chaque mètre carré de toiture verte en capte en moyenne 2,5 kg par an, rentabilisant sa construction en 12 ans, et menant, sur sa durée de vie, à un gain.

13.2.2. Résultats



Totaux: 69.767 € 31,7 €/m² - 1.189,2 t CO₂e 540,5 kg/m²

NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.02 : GWP monétisé - Toiture végétalisée

La toiture végétalisée, grâce à son bilan négatif en CO₂e, compense totalement les émissions de CO₂e dues aux remplacements (modules B). La comptabilisation de la captation dans le domaine "parois" permet de faire diminuer leur impact de 14.000 euros et de les amener dans un ordre d'importance davantage similaire à celui de la structure qu'à celui de l'énergie. De plus, l'amélioration de l'isolation de la toiture permet de faire baisser la consommation de gaz et l'impact environnemental qui y est associé de 17%.

Finalement, ce scénario permet une baisse de 21,4% du coût écologique.

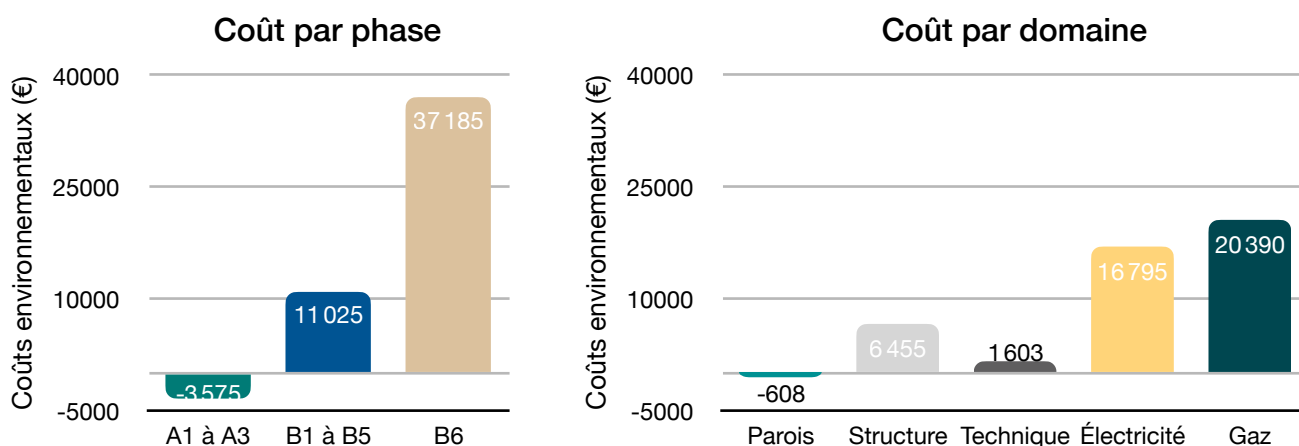
13.3. ACV du scénario "Sur-isolation bio-sourcée & vitrages" (P2)

13.3.1. Particularités économiques du scénario

Avec leurs matériaux bio-sourcés, les nouvelles parois bénéficient fortement de la comptabilisation du carbone biogénique. Selon leur fiche technique, les panneaux de CLT et l'isolant PAVATEX (fibres de bois) ont respectivement des scores négatifs de 594 kg/m³ et de 255 kg/m³ pour leurs modules A₁ à A₃ (IBU, 2014; IBU, 2018). Le bardage métallique, choisi pour des raisons économiques, tire par contre l'équilibre dans l'autre sens. Ses 32 tonnes induisent l'émission de près de 79 tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pour leur production.

L'ajout d'exutoires de fumée vitrés en toiture entraîne une augmentation de leurs émissions de CO₂e durant les modules A ainsi que durant les modules B vu leur besoin d'être remplacés après 30 ans.

13.3.2. Résultats



Totaux: 44.635 € 20,3 €/m² - 661,6 t CO₂e 300,7 kg/m²

NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.03 : GWP monétisé - Sur-isolation bio-sourcée et vitrages

Grâce aux nouvelles compositions des murs et de la toiture, le coût écologique des parois est rendu négatif, tout comme celui regroupant les contributions qui arrivent durant les modules A₁ à A₃.

Avec ce procédé de construction écologique, la part de l'énergie atteint 83,3% du coût total. Celui-ci est donc très dépendant des facteurs de conversion utilisés pour transformer les consommations en quantité de CO₂e. Ce procédé permet également une baisse de moitié du coût environnemental total.

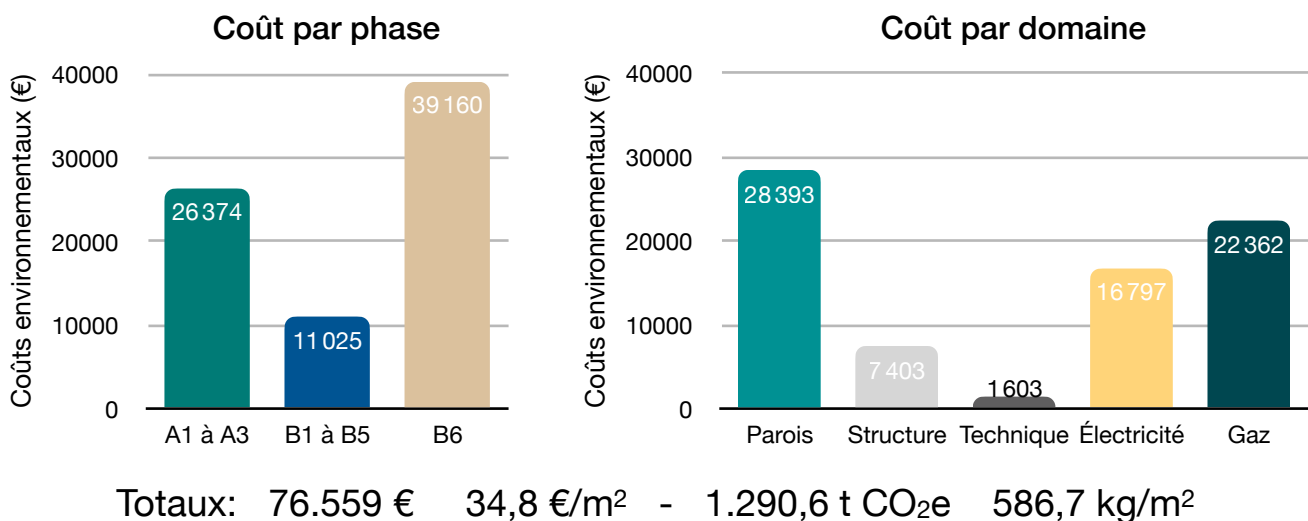
13.4. ACV du scénario "Sur-isolation PIR & vitrages" (P3)

13.4.1. Particularités économiques du scénario

Ce scénario recourt à un matériau issu de la pétrochimie pour assurer sa sur-isolation. Les avantages sont donc plus d'ordre économique que écologique. Avec une épaisseur moyenne des panneaux sandwich 20% supérieure à l'originale, leur impact sur le réchauffement climatique s'en voit augmenté. Les nouveaux panneaux représentent maintenant l'émission de 230 tonnes de CO_{2e}, soit 42 de plus qu'avec les modèles précédents.

Pour la partie "vitrages" du scénario, les mêmes remarques que celles relatives au scénario P2 peuvent être dressées: les coûts environnementaux de leurs modules A et B (hors B₆) augmentent.

13.4.2. Résultats



NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.04 : GWP monétisé - Sur-isolation PIR et vitrages

Ce scénario retrouve une répartition des coûts environnementaux très similaire à celle du cas de base. 176 tonnes de CO_{2e} sont cependant évitées avec celui-ci via la baisse de demandes énergétiques.

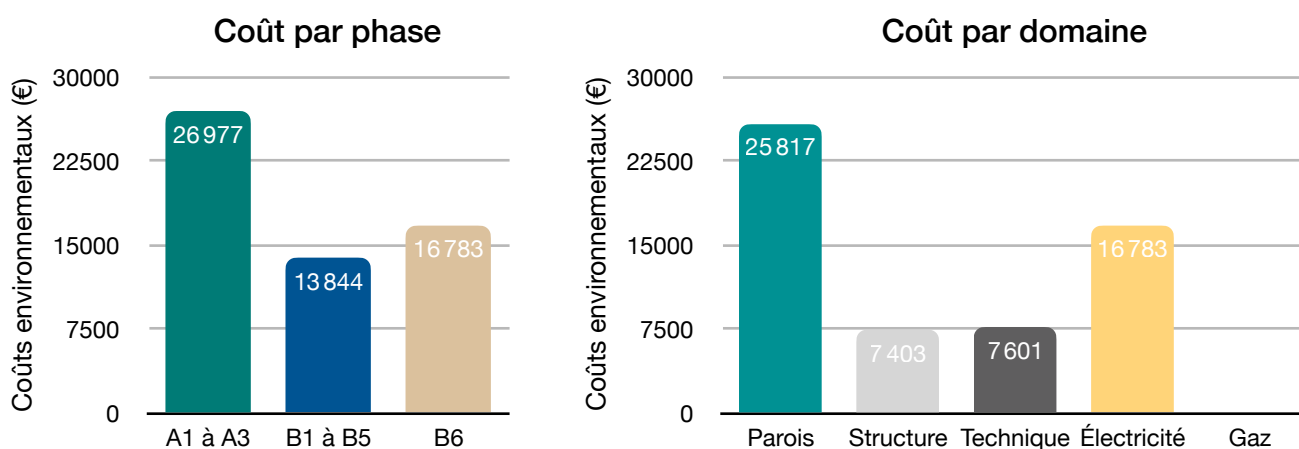
13.5. ACV du scénario "Pompe à chaleur & installation photovoltaïque" (S1)

13.5.1. Particularités économiques du scénario

L'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique requiert, évidemment, également la création de puits de captage thermique. Ainsi, l'installation d'un tel système est à l'origine d'une émission de près de 25 tonnes de CO₂e. Une économie sera ensuite réalisée grâce à l'utilisation de chaleur "propre" du sol.

La fabrication de panneaux solaires photovoltaïques est connue pour être néfaste à l'environnement. La base de données ICE estime qu'un mètre carré de panneaux polycristallin est à l'origine de 208kg de CO₂e. La fabrication des panneaux utilisés pour ce scénario équivaut donc à 35,8 tonnes de dioxyde de carbone. Dans une analyse complète du cycle de vie, ils présenteraient cependant un double avantage. Tout d'abord au niveau du module B₆, l'électricité consommée qui provient de la production des panneaux est considérée propre et aucun impact sur le réchauffement climatique ne lui est associé. Ensuite, au niveau du module D, le fait d'injecter de l'électricité propre sur le réseau est récompensé. Autant le premier avantage sera bien présent ici, le deuxième portant sur un module non considéré sera lui ignoré³⁸.

13.5.2. Résultats



Totaux: 57.604 € 26,2 €/m² - 1.004,2 t CO₂e 456,4 kg/m²

NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.05 : GWP monétisé - Pompe à chaleur et installation photovoltaïque

Un élément qui est directement remarqué dans ces résultats est la fonte de la part de l'énergie. En passant de 60,8% à 29,1 %, elle n'est plus que le deuxième domaine le plus important en terme de CO₂e équivalent. Il est important de noter que cette chute est due à la baisse de la consommation énergétique totale et non à une augmentation de tous les

³⁸ L'injection du surplus électrique sur le réseau permet de faire économiser 251,6 t de CO₂e à la collectivité.

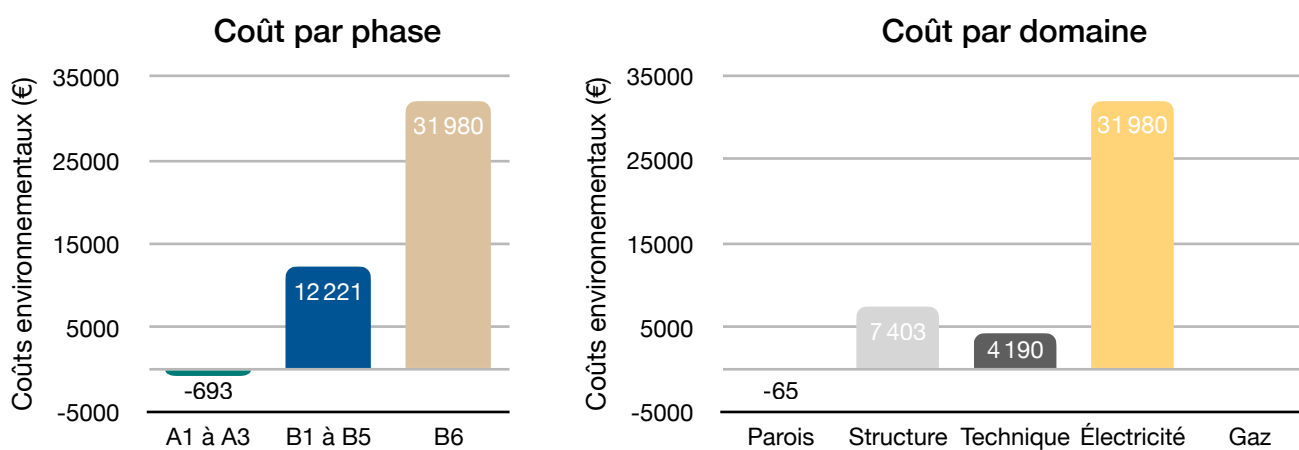
autres domaines. Bien que les facteurs de conversion de l'électricité et du gaz soient proches, l'absence de consommation de gaz aide également à baisser le coût de compensation de l'énergie. Finalement, une économie de 460 tonnes de CO_{2e} est réalisée sur la durée de l'étude.

13.6. ACV du scénario "Isolation bio-sourcée & PAC" (C1)

13.6.1. Particularités économiques du scénario

Les particularités liées à la modification de la composition des parois et à l'installation d'une pompe à chaleur ont déjà été énoncées ci-dessus pour les scénarios P2 et S1 et ne seront donc pas répétées. Il est toutefois intéressant de noter que la quantité de panneaux isolants bio-sourcés de ce scénario est moins importante que celle mise en œuvre dans le scénario P2. L'ampleur de l'avantage qu'aura la comptabilisation du carbone biogénique sur ce cas est donc diminuée.

13.6.2. Résultats



Totaux: 43.508 € 19,8 €/m² - 658,2 t CO_{2e} 299,2 kg/m²

NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.06 : GWP monétisé - Isolation bio-sourcée et pompe à chaleur

Avec uniquement des contributions positives au niveau des modules B et de la consommation électrique, ce scénario permet une économie de plus de la moitié du coût écologique comparé au cas de base. L'émission totale de CO_{2e} passe tout juste sous la barre des 300 kg/m².

Les parois présentent un bilan à l'équilibre grâce au carbone biogénique. Elles deviennent ainsi le domaine le moins impactant tandis que la contribution de l'énergie, bien qu'abaissée, reste la plus importante. Sa proportion sur le coût total augmente même à cause de la baisse des parois; elle passe à 73,5%.

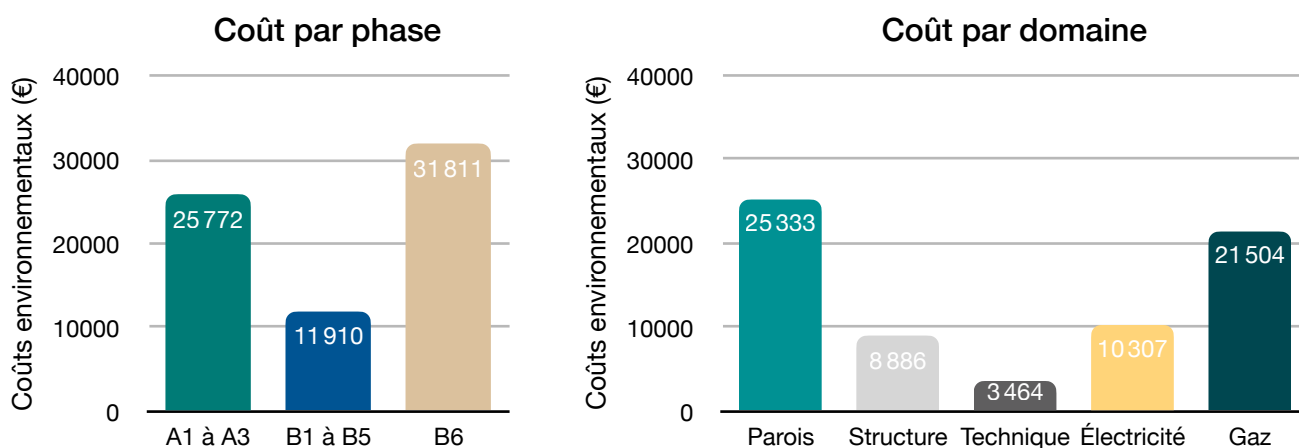
13.7. ACV du scénario "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" (C2)

13.7.1. Particularités économiques du scénario

Les particularités liées à l'installation photovoltaïque et aux vitrages ont déjà été abordées ci-dessus, pour les scénarios P2 et S1. Outre ces particularités, un élément important de ce scénario d'un point de vue écologique est l'augmentation de la quantité de béton mise en œuvre au niveau des parties enterrées du bâtiment pour reprendre la poussée du sol.

Le fait d'excaver le sol étant relatif au module A₅, il n'est pas pris en compte dans ce travail. Il n'est de toute façon pas attendu que celui-ci ait un impact important sur le réchauffement climatique. D'autres indicateurs auraient dû être considérés pour l'évaluer.

13.7.2. Résultats



Totaux: 69.493 € 31,6 €/m² - 1.179,8 t CO₂e 536,3 kg/m²

NB: Les coûts des différents types et domaines sont arrondis à l'unité

Figure 13.07 : GWP monétisé - Installation photovoltaïque, vitrages et enfouissement

Ce dernier scénario se marque par une baisse importante du coût écologique de la consommation d'énergie. Cette baisse s'explique par les éléments suivants: les vitrages permettent une baisse de la consommation électrique; les panneaux photovoltaïques rendent 40% de cette consommation propre; l'enfouissement du bâtiment limite les déperditions thermiques et donc les besoins de chauffage par rapport à la situation existante du cas d'étude. Ce scénario permet d'économiser près de 300 tonnes de CO₂e sur la durée de l'analyse (50 ans).

Les contributions arrivant en cours de cycle de vie valent désormais 63% des coûts totaux, en baisse par rapport au cas de base.

Même si les panneaux photovoltaïques sont, à l'usage, intéressants selon ce critère, leur installation fait doubler le coût écologique des techniques. À titre d'information, l'injection du surplus de la production photovoltaïque offre une économie de près de 200 tonnes de CO_{2e} à la collectivité.

13.8. Conclusion de l'étude environnementale

13.8.1. Comparaison des résultats des différentes ACV

Les résultats de l'ACV des différents scénarios et du cas d'étude ont été présentés. Ils peuvent maintenant être comparés les uns aux autres afin de déterminer les options les moins propices au réchauffement climatique.

Pour aider à la comparaison, les résultats sont résumés sur un seul graphe, à la *Figure 13.08*. Le coût écologique total ainsi que les coûts des modules A, B et de l'énergie y sont présentés en parallèle.

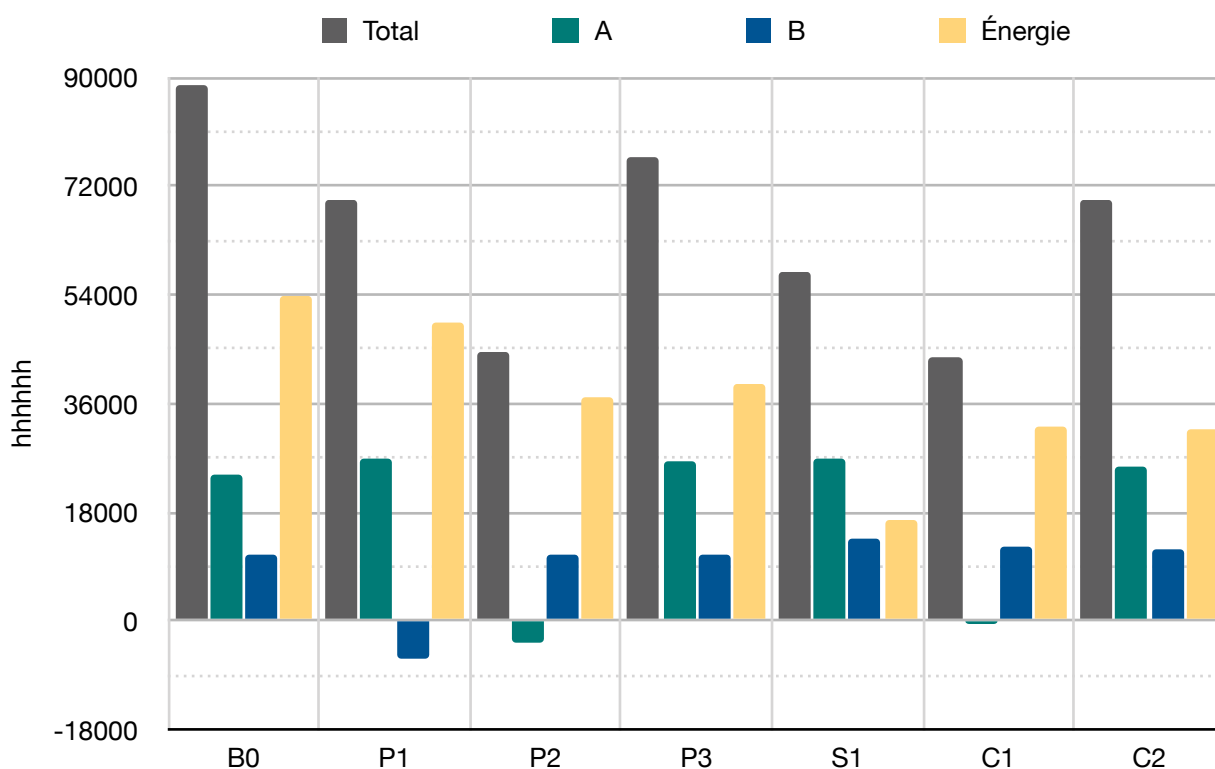


Figure 13.08 : Comparaison des coûts environnementaux

Les constatations suivantes peuvent être énoncées à partir de ce graphique:

- Tous les scénarios évalués améliorent le niveau écologique global du cas d'étude.
- Les deux scénarios les plus performants sont P2 et C1. Ils ont le point commun de présenter une valeur négative pour les coûts environnementaux des modules A. Avec eux, l'avantage d'utiliser des matériaux bio-sourcés est très clairement présenté.

- Les scénarios "parois" comprennent l'option la plus performante mais également les deux moins performantes. Ceci illustre le fait que simplement prévoir une amélioration de l'isolation des parois ne suffit pas à assurer des gains optimaux. Le choix des éléments présents dans les scénarios est ainsi plus important que le simple choix d'agir sur les parois ou les systèmes.
- L'avantage des matériaux bio-sourcés est d'autant plus visible en comparant les résultats des scénarios P2 et P3. Tablant tous les deux sur une sur-isolation des parois et sur une augmentation de la quantité de lumière naturelle entrante, ils diffèrent uniquement par la nature de l'isolant utilisé. P2, avec son isolant en fibres de bois, finit 32.000 € moins cher que P3 et ses panneaux sandwich à âme PIR.
- Tous les scénarios s'accompagnent d'une baisse du coût écologique dû à l'énergie. Certains l'atteignent via une baisse du besoin de chauffage, d'autres par une baisse de la consommation électrique ou via les deux. Les deux scénarios avec les plus faibles contributions de l'énergie sont les deux scénarios dans lesquels une installation photovoltaïque est intégrée.
- Avoir une émission plus importante de CO₂e dans les premiers modules du cycle de vie (modules A) n'est pas un signe qu'un scénario va être moins performant. Quatre des six étudiés présentent des valeurs initiales plus importantes que le cas d'étude bien qu'ils s'avèrent globalement bien plus performants. Le scénario P1 compense son surplus par une captation du dioxyde de carbone durant le cycle de vie, tandis que S1 et C2 peuvent compter sur leur investissement dans une installation photovoltaïque pour diminuer l'impact de leur consommation.
- Au vu de ces résultats, les parois en matériaux bio-sourcés, la valorisation de l'éclairage naturel et l'installation d'une pompe à chaleur géothermique semblent être des pistes principales à envisager.

13.8.2. Analyse de la sensibilité

Pour conclure cette section relative aux analyses du cycle de vie, la sensibilité des résultats par rapport au choix du facteur de conversion liant consommation en kWh et émission de CO₂e est vérifiée. En effet, dans la *Section 6. Méthodologie - Analyse du cycle de vie*, une hypothèse importante avait été réalisée pour déterminer l'impact sur le réchauffement climatique de la consommation électrique. Le facteur de conversion pour les 50 années avait été choisi égal à sa moyenne sur la période 2015-2019.

De plus, comme observé à la *Figure 13.08*, l'impact des consommations énergétiques est prépondérant dans les résultats des différentes analyses. Vérifier la sensibilité des résultats des ACV par rapport au facteur choisi semble donc bien primordial pour assurer la fiabilité des conclusions portées ci-dessus, au *Point 13.8.1*.

Les analyses des différents scénarios sont donc réalisées à nouveau avec, cette fois les valeurs 0,095 kg/kWh et 0,247 kg/kWh pour le facteur de conversion kWh électrique vers émission de CO₂e. Les coûts écologiques totaux ainsi obtenus pour chacun des cas sont présentés à la *Figure 13.09*. Les classements des sept cas (de 1: le plus coûteux à 7: le moins coûteux) sont indiqués au bas des barres pour chacune des valeurs considérées du facteur.

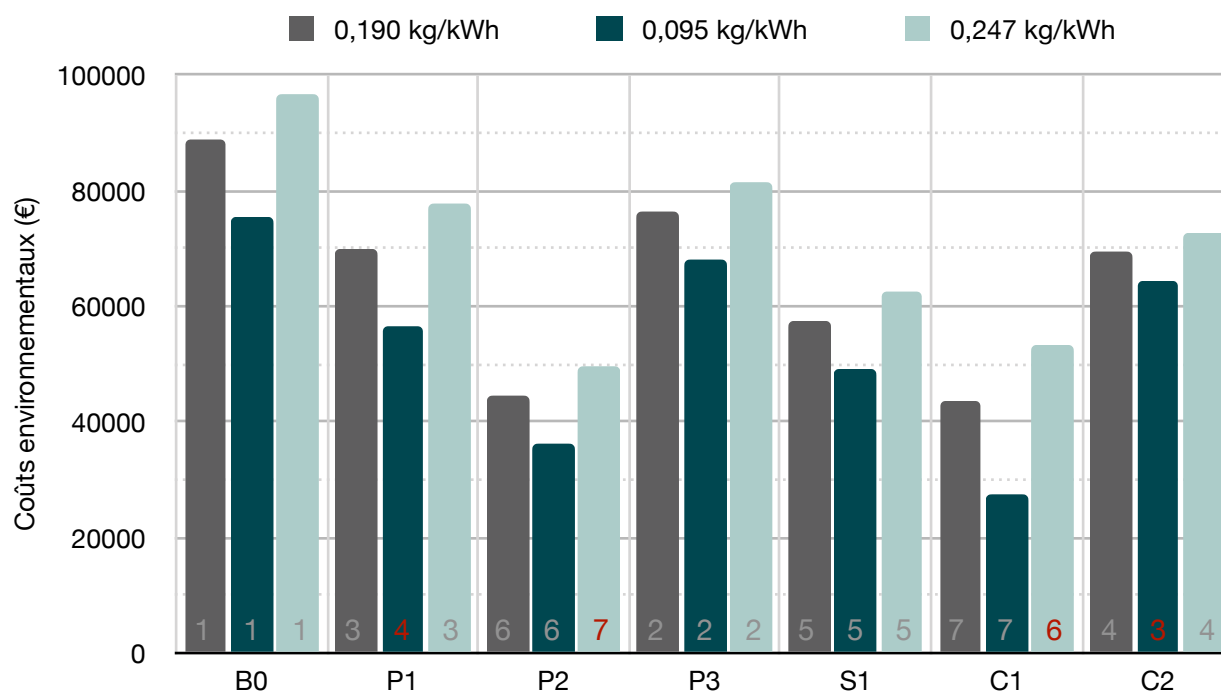


Figure 13.09 : Résultats de l'étude de sensibilité des coûts environnementaux

Au vu des résultats de l'analyse de la sensibilité, il peut être conclu que, quel que soit le facteur considéré, tous les scénarios étudiés offrent des résultats plus performants que le cas d'étude.

Le classement des scénarios, du plus au moins durable, est pratiquement inchangé quel que soit le facteur considéré. Avec la valeur la plus importante (0,247 kg/kWh), seuls les deux plus performants, P2 et C1, échangent leur position. Ces deux scénarios présentaient un coût très proche dans la première analyse. Dans celle-ci, P2 était le plus cher des deux. Cependant, C1 ayant la plus grande contribution électrique des deux, une augmentation du coût de celle-ci lui sera, logiquement, plus néfaste. De même, avec la valeur plus faible (0,095 kg/kWh), une seule inversion est présente. Celle-ci n'affecte cette fois pas le trio de tête. Ce sont les troisième et quatrième plus coûteux qui échangent leur position. Ils présentaient une valeur quasiment identique dans la première analyse. C2 présentant une consommation électrique très faible grâce à sa gestion de l'éclairage et à sa production photovoltaïque n'aura qu'un avantage très réduit si l'impact environnemental de celle-ci venait à diminuer.

Il est mesuré que le coût total est modifié en moyenne de 3,5% pour une modification de 10% de la valeur du facteur de conversion. La plus grande variation appartient au scénario C1 avec 7,35%/10%. La plus faible est au scénario C2 avec seulement 1,48% de variation par 10%. Cela corrobore les observations faites sur le changement de classement. Le cas de base évolue à hauteur de 3% par 10% de changement.

13.8.3. Conclusion

L'influence du choix du facteur de conversion énergétique est considérée faible et les résultats de l'étude jugés fiables. Les conclusions tirées avec la valeur de base du facteur restent donc inchangées.

Les trois meilleurs scénarios à envisager pour une visée environnementale sont "Sur-isolation bio-sourcée et pompe à chaleur", "Sur-isolation bio-sourcée et vitrages" et "Pompe à chaleur et installation photovoltaïque". Le podium de tête est donc constitué de trois scénarios de nature différente: un "Parois", un "Système" et un "Composé". Afin de limiter l'impact environnemental d'un hall sportif il n'existe donc pas un seul domaine dans lequel il vaudrait mieux investir. Des gains importants sont possibles via les trois approches, en particulier via l'utilisation d'isolants naturels, d'un système de gestion de l'éclairage (dimming) et de pompes à chaleur performantes.

14. Comparaison des résultats

Dans cette section, les scénarios vont être comparés les uns aux autres sur base de leurs résultats respectifs dans chacune des trois analyses menées dans ce travail (analyse du coût du cycle de vie, analyse du cycle de vie et analyse du confort). Le but est de déterminer le ou les scénarios qui répond(ent) le mieux à la problématique principale de ce travail. Pour rappel, celle-ci consiste à déterminer quelles mesures à visées environnementales sont les plus intéressantes à considérer pour un hall sportif. La priorité est de minimiser les coûts globaux et l'impact environnemental, tout en maintenant un confort optimal.

14.1. Résumé et comparaison des résultats

Pour faciliter la comparaison, les résultats des sections précédentes sont résumés aux *Figures 14.01 et 14.02*. La première illustration compare les résultats des ACCV, des ACV et de l'indicateur de confort des six scénarios. Les résultats sont représentés à partir des différences, exprimées en %, entre les valeurs relatives aux scénarios et celles du cas d'étude. D'un point de vue économique, on y voit nettement que des gains plus importants sont réalisés sur les impacts environnementaux (en vert) que sur le coût global (en bleu). Cependant, il a déjà été noté que les coûts des compensations environnementales sont bien plus faibles que les coûts globaux. Pour le cas d'étude déjà, la monétisation des impacts dus aux émissions de CO_{2e} ne valait que 2% du coût global. Ainsi, bien que les coûts économiques globaux soient moins modifiés en pourcentage, c'est leur évolution qui prévaut sur l'évolution des coûts totaux, correspondant à la somme de la monétisation de l'indicateur GWP et des coûts économiques. Ceux-ci sont représentés sur la deuxième figure. Celle-ci rappelle également les valeurs des indicateurs de surchauffe des six scénarios et du cas de base.

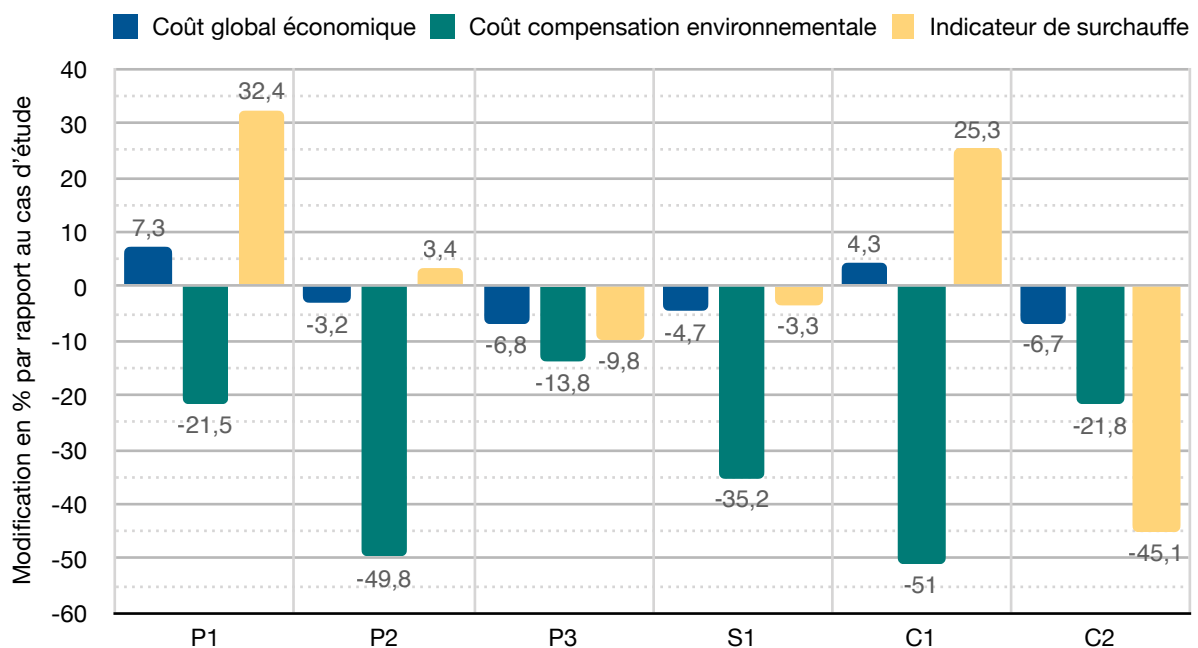


Figure 14.01 : Comparaison des résultats de coûts

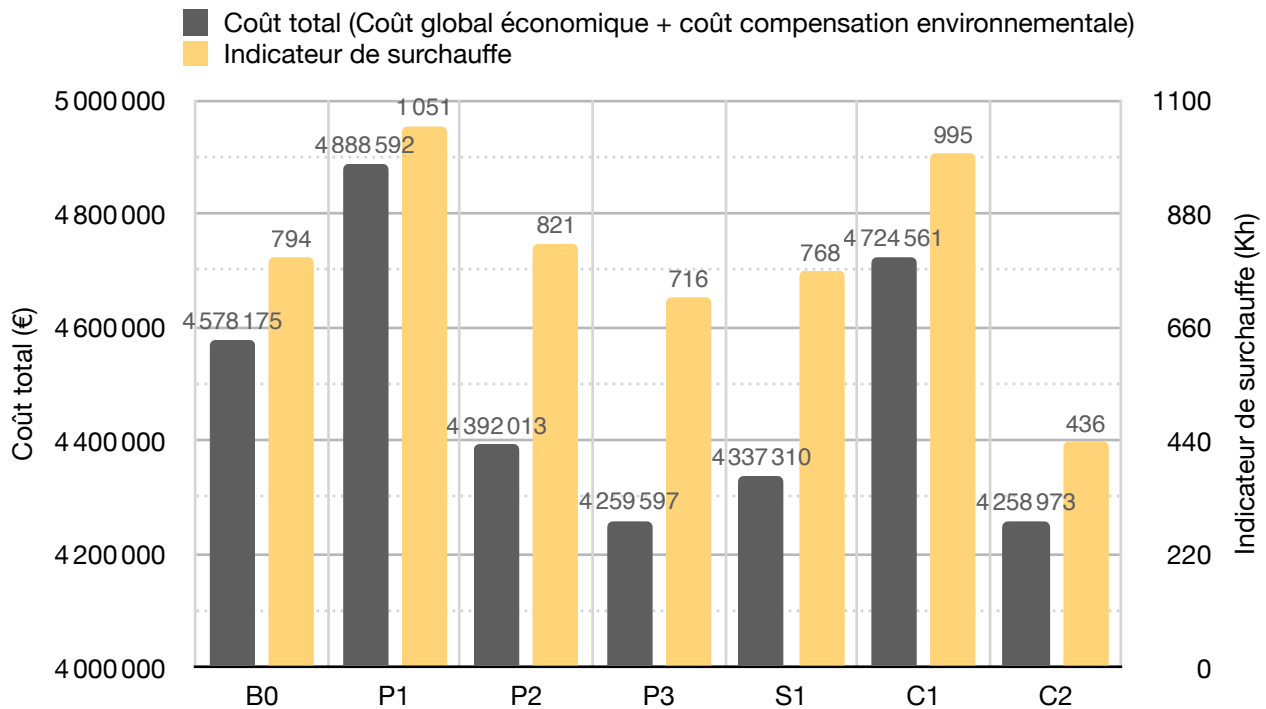


Figure 14.02 : Comparaison des résultats de coûts totaux et de confort

14.2. Constatations et remarques

La Figure 14.02 permet de constater qu'un scénario présente simultanément le meilleur indicateur de surchauffe et le meilleur coût total. Ce scénario est le scénario C2 "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement". Du type "composé", il recourt aussi bien à une modification de ses systèmes que de ses parois et de son implantation.

C'est également un même scénario qui présente les deuxièmes meilleures performances d'indicateur de surchauffe et de coût total et un même scénario pour les troisièmes meilleures performances. Ainsi, le scénario P3 "Sur-isolation PIR et vitrages" prend la deuxième place tandis que S1 "Installation photovoltaïque et pompe à chaleur" la troisième. Selon ces deux critères, coût total et surchauffe, le podium est donc occupé par trois scénarios de types différents. Tous trois consistent en une amélioration par rapport au cas d'étude dans les trois domaines considérés dans ce tfe. Il faut malgré tout remarquer que l'amélioration sur le plan environnemental du scénario P3 est très faible.

Cependant, comme énoncé ci-dessus, les coûts des compensations environnementales n'ont qu'un impact limité sur le coût total. Les scénarios qui présentent les plus faibles coûts totaux ne sont pas forcément ceux qui présentent les plus faibles impacts sur le réchauffement climatique. C'est notamment le cas ici. Deux des trois scénarios P2, S1, C1 qui diminuent le plus l'impact environnemental ne font pas partie du trio avec les coûts totaux les plus faibles. Seul le scénario S1 parvient à lier les deux, se classant troisième plus écologique et troisième en coût total.

Le scénario P2 "Sur-isolation bio-sourcée et vitrages" subit fortement les conséquences d'un coût environnemental peu important sur le total. Ce scénario acceptait d'être moins rentable afin de bénéficier de gains environnementaux supérieurs. Il a ainsi fini deuxième de l'étude écologique. Il présente d'ailleurs des gains environnementaux doubles de ceux du meilleur scénario C2. Cependant, son coût plus important ne lui a permis d'atteindre que la quatrième place en termes de coût total.

Une autre constatation qui peut être réalisée est que les deux scénarios les moins confortables sont également les deux scénarios dont les mesures ne sont pas rentables sur la durée d'étude considérée. Ce sont les scénarios P1 "toiture végétalisée" et C1 "Sur-isolation bio-sourcée & pompe à chaleur". Ils ne seront donc pas considérés comme adaptés à être intégrés à un hall sportif selon cette étude. Il est cependant intéressant de noter que le scénario C1 présentait les gains environnementaux les plus importants des six scénarios. Les mauvais résultats des deux scénarios P1 et C1 en confort s'expliquent par l'amélioration de leur isolation sans prise de mesures particulières pour réduire la surchauffe. En diminuant le coefficient de transmission thermique des parois, les gains internes dus à l'activité des utilisateurs sont moins évacués vers l'extérieur, augmentant la température dans la salle, source d'inconfort.

14.3. Conclusion

Finalement, il peut être conclu à l'aide des *Figures 14.01 et 14.02* et des remarques portées au *Point 14.2*, que les scénarios les plus intéressants vis-à-vis des objectifs de ce tfe sont les scénarios C2 (classé 1^{er}) et S1 (classé 3^e). Le scénario P3, bien que classé 2^e, est décevant en termes de coût environnemental. Un aspect pourtant essentiel de l'analyse réalisée dans ce tfe. Par contre, le scénario P2, occupant la 4^e place, est très performant selon ce critère. Il est donc décidé de le conserver. Il rejoint ainsi les scénarios mis en avant.

15. Discussion

Au sein de ce chapitre, trois points principaux vont être abordés. Tout d'abord, les découvertes principales, réalisées au sein des différentes sections "Résultats", vont être synthétisées. Cela permettra d'émettre une série de réponses aux questions de recherche traitée dans ce mémoire. Ensuite, les forces et limitations rencontrées au fil du travail sont présentées. Finalement, l'utilisation qui pourrait être faite des conclusions de ce travail et les ouvertures qu'il crée pour de futurs travaux seront décrites.

15.1. Découvertes principales et recommandations

15.1.1. Rappel des objectifs du travail et de ses hypothèses

Tout au long de ce travail, la problématique suivante a été étudiée: Comment construire des halls sportifs plus durables en Belgique, tout en limitant leur impact financier et en y maintenant un confort optimal (évalué selon le taux de surchauffe). Pour analyser ce thème, six scénarios d'adaptation d'un cas d'étude ont été étudiés via différentes analyses. L'objectif était de se focaliser sur les questions de recherche suivantes:

- *Quels sont les scénarios les plus avantageux à mettre en œuvre dans un hall sportif à budget restreint en Belgique et quels gains permettent-ils?*
- *Investir dans les systèmes est-il plus rentable, économiquement et écologiquement, qu'investir dans les parois? Est-ce l'inverse? Ou est ce qu'un équilibre entre les deux est nécessaire?*
- *L'utilisation de matériaux bio-sourcés dans un hall sportif est-elle intéressante d'un point de vue économique et environnemental et pour le confort des usagers?*

Afin de mener à bien les différentes études, une série d'hypothèses ont dû être prises. Tout d'abord, pour les analyses du cycle de vie, il a été décidé de prendre en compte le carbone biogénique pour représenter l'impact positif de l'utilisation de matériaux bio-sourcés. Pour ces ACV, le facteur de conversion des kWh électriques prélevés du réseau en émission de CO_{2e} a été choisi constant sur les 50 années de l'étude et sa valeur prise égale à la moyenne des valeurs des années 2015 à 2019 incluses. Pour l'analyse du coût du cycle de vie, une hypothèse a également été posée: aucun subside n'est pris en compte.

Il est également important de rappeler que le cas d'étude comprend déjà un récupérateur de chaleur performant sur sa VMC. Cet élément ne fera donc pas partie des recommandations supplémentaires émises sur base des résultats. Il n'en reste pas moins qu'il s'agit d'un composant dont l'installation dans un hall sportif est très avantageux comme abordé dans l'étude Step2Sport (2017).

15.1.2. Résolution des questions de recherche et discussion des résultats

De nombreux éléments de réponse aux questions de recherche ont été évoqués dans les différentes sections "Résultats" de ce travail et en particulier à la *Section 10. Comparaison des résultats*.

Il est ainsi observé que les scénarios les plus performants, selon les critères de ce travail pris simultanément tout en mettant l'accent sur l'aspect environnemental, sont, dans l'ordre décroissant des gains, les scénarios C2 "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement", S1 "Installation photovoltaïque et pompe à chaleur" et P2 "Sur-isolation bio-sourcée et vitrages". Les scénarios P1 "Toiture végétalisée", C1 "Sur-isolation bio-sourcée et pompe à chaleur" et P3 "Sur-isolation PIR et vitrages" sont, eux, jugés moins pertinents. Les deux premiers amènent à une forte augmentation de l'inconfort dans la salle et présentent un coût global sur 50 ans plus important que celui du cas de base. Le scénario P3 amène lui des gains environnementaux trop faibles par rapport aux autres scénarios.

Le trio de tête montre que des gains importants peuvent être réalisés via un travail des parois, des systèmes ou des deux simultanément. En effet, les trois meilleurs scénarios appartiennent à des types de scénario différents comme l'indique la lettre de leur identifiant. Lorsqu'on souhaite améliorer les performances d'un hall sportif³⁹, les scénarios à envisager ne doivent donc pas obligatoirement adopter une de ces trois approches pour être valables. L'important est de choisir pertinemment les différents composants qui constituent les scénarios d'adaptation. Ceux-ci doivent se répondre, être mutuellement bénéfiques. En considérant plus en détail les différents scénarios "vainqueurs", ces relations de bénéfice mutuel peuvent être repérées.

Les scénarios P2 "Sur-isolation bio-sourcée et vitrages" et C2 "Installation photovoltaïque, vitrages & enfouissement" ont tous les deux un composant qui limite les transferts de chaleur par les parois: une sur-isolation pour le premier et l'enfouissement pour le deuxième. Ceux-ci limitent bien les déperditions thermiques en hiver mais emprisonnent davantage la chaleur à l'intérieur en été. Cependant, ces deux scénarios possèdent une autre mesure qui permet de répondre à cet inconvénient: la modification des surfaces de vitrages. Celle-ci, via l'augmentation de surfaces translucides en toiture (+50 %) et la re-localisation des ouvertures latérales sur une même façade, permet une ventilation naturelle importante durant ces périodes chaudes. Les scénarios P1 "Toiture végétalisée" et C1 "Sur-isolation bio-sourcée et pompe à chaleur" comportent également une amélioration de l'isolation, mais pas d'éléments particuliers pour la surchauffe. Le scénario P1 compte uniquement sur la présence de végétaux en toiture pour limiter les gains solaires tandis que C1 ne dispose d'aucun dispositif particulier. Les mauvais résultats de P1 et C1 concernant la surchauffe corroborent ce qui a été dit sur l'intérêt de l'ajout des vitrages pour P2 et C2. Le fait que l'ajout d'un système de ventilation naturelle soit bénéfique aux infrastructures sportives a déjà été montré par Accili (2016).

³⁹ Performances dans le sens considéré par cette étude: confort - impact environnemental - coût global.

Une autre relation de bénéfice mutuel peut être repérée entre la pompe à chaleur géothermique et les panneaux photovoltaïques. L'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'augmenter la part de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques qui est consommée par le bâtiment. Et inversement, la présence de panneaux photovoltaïques permet l'utilisation d'une plus grande part d'énergie "verte" et gratuite par la pompe à chaleur. Les gains sont visibles en comparant les résultats énergétiques des scénarios S1, C1 et C2. Parmi ceux-ci, seul S1 "Installation photovoltaïque et pompe à chaleur" possède les deux systèmes.

Il a été montré qu'avec un investissement initial augmenté de maximum 15%, des gains allant jusqu'à -51% des coûts de compensation environnementale et -6,7% des coûts globaux sont atteignables sur une période de 50 ans. Une baisse de 45% de l'indicateur de surchauffe est également possible. Évidemment tous ces gains ne sont pas atteignables à ces niveaux simultanément. En faisant la moyenne sur les deux scénarios les plus adaptés, les gains sont légèrement moindres mais toujours intéressants. On obtient ainsi des coûts environnementaux abaissés de 28,6%, des coûts économiques globaux affichant -5,7% et un indicateur de surchauffe en baisse de 24%.

En considérant séparément les trois domaines de ce travail, confort - impact environnemental - coût global, des recommandations différentes sur les meilleurs scénarios ne devraient être prises que pour le deuxième. En effet si seul l'impact environnemental était considéré, les mesures les plus adaptées seraient alors celles mettant en œuvre des matériaux bio-sourcés. L'ajout d'une installation photovoltaïque et/ou d'une pompe à chaleur serait également très intéressant pour leur production d'énergie propre. D'un point de vue économique, l'analyse du coût du cycle de vie a établi que baisser la quantité d'électricité consommée par le bâtiment était une solution très efficace pour faire baisser le coût global. Diminuer la quantité à prélever sur le réseau amène rapidement les plus gros gains économiques. Toucher à la consommation électrique a ainsi plus d'influence sur le coût global que choisir des matériaux et produits moins chers ou à la durée de vie plus longue et nécessitant donc moins de remplacement. De même, diminuer les déperditions thermiques de l'enveloppe n'aura pas un effet important sur le coût total du bâtiment, le coût d'investissement supplémentaire étant difficilement récupérable sur la durée de vie. Une diminution de la valeur U des parois risquent de plus d'amener davantage de surchauffe si aucune mesure de refroidissement n'est prise.

Une remarque est intéressante à mettre en évidence concernant le scénario P1 "toiture végétalisée". Ce scénario arrive à la dernière ou avant-dernière position des six scénarios pour les résultats des trois études. Il aurait cependant pu devenir intéressant si le budget maximum avait été augmenté. Dans ce cas, des mesures auraient pu être prises pour limiter naturellement la surchauffe et pour revoir l'utilisation qui est faite de l'énergie dans la salle. Pouvoir rendre la création d'une toiture végétalisée non problématique pour ce genre d'établissement est important. Ce type de toiture est par exemple obligatoire à Bruxelles pour les toitures plates de plus de 100m², surface aisément dépassée par les halls sportifs (Guide bâtiment durable, 2016).

En comparant les résultats des scénarios P2 et P3, il est possible de répondre à la troisième question de recherche portant sur l'intérêt d'utiliser des isolants naturels. En comparant leurs résultats, on remarque que P3 (isolant à base de polyisocyanurate) offre des gains plus importants en confort et en coût économique. Le cas P2 (isolant en fibres de bois) ne l'emporte lui que dans l'analyse du cycle de vie. L'écart en confort est faible. Il s'explique par le fait que l'étanchéité à l'air est meilleure avec les panneaux de CLT qu'avec les panneaux sandwich emprisonnant ainsi davantage la surchauffe en été. Les principales différences se situent plutôt au niveau des coûts. Un investisseur aux moyens très limités verra ainsi en les presque 7% de baisse du coût économique offert par P3 un avantage considérable par rapport aux 3% de gains de P2. Il aura ainsi intérêt à choisir d'utiliser un isolant issu de la pétrochimie pour (sur-)isoler son hall sportif. Cependant, si son budget le permet et qu'il a une volonté de respect de l'environnement, il devrait aller vers l'utilisation d'un isolant naturel. Ceux-ci affichent effectivement un compromis plus équitable entre gains économique et environnementaux. De plus, bien que ça n'ait pas été abordé dans cette étude, ils présentent davantage de possibilités de recyclage et de réutilisation que les panneaux sandwich. Il est cependant évident que le simple fait que l'isolant soit bio-sourcé ne suffit pas à assurer un faible impact environnemental. Il est important d'en choisir un qui soit produit localement et issu d'un processus géré durablement (forêt PEFC,...), sans quoi l'argument d'utiliser un isolant bio-sourcé pour limiter l'impact environnemental du bâtiment serait inadéquat.

15.2. Forces et limitations

Les analyses réalisées dans ce mémoire suivent des normes strictes, reconnues et déjà largement présentes dans la littérature. Utiliser une base normative est gage de sérieux et mène à des résultats qui seront aisément ré-exploitable par de futurs chercheurs. La popularité des méthodes mises en œuvre assure l'adéquation du travail avec les attentes actuelles de la littérature. De plus, les résultats obtenus à ces analyses sont fournis en détail. De la même façon, les méthodologies utilisées pour modéliser et simuler les différents scénarios sont explicitées avec précision pour permettre une réplique par des tiers. Ces éléments font de ce travail une base potentielle pour des études futures.

Un autre élément renforçant la fiabilité des résultats de ce travail est la grande attention qui a été portée à la triangulation des sources et à la vérification des résultats. Pour toutes les données utilisées dans la modélisation des scénarios, deux autres sources ont été utilisées pour en valider les valeurs. De plus, les résultats d'autres études ont été utilisés pour orienter le choix des mesures à étudier et pour valider les résultats obtenus. Ce travail est donc ancré dans des valeurs concrètes et validées. Des études de sensibilité sont également entreprises pour vérifier l'impact de certaines hypothèses réalisées.

Une autre force du travail est de considérer un grand nombre d'indicateurs afin d'exprimer des recommandations. Les éléments suivants ont notamment été pris en compte: le budget d'investissement, le confort, le coût global et l'impact environnemental des solutions envisageables. Ceci permet de respecter la volonté européenne qui consiste à considérer conjointement les paramètres économiques, environnementaux et de confort. Cela permet également d'assurer à un investisseur potentiel que son investissement aura un coût optimal vis-à-vis des améliorations écologiques qu'il crée et

ce, tout en maintenant l'utilisateur au centre des préoccupations. Le résultat de ce travail pourra ainsi être directement mis à profit par ceux-ci.

Finalement, le choix du cas d'étude représente une autre force de ce travail. En choisissant un hall sportif avec une activité bien définie, il est possible de fournir des recommandations plus précises, qui seront aisément applicables à d'autres centres du même type. Step2Sport, en agrégeant les résultats obtenus pour les halls sportifs, complexes sportifs, piscines publiques et patinoires, dilue la précision de ses recommandations. De plus, le bâtiment qui a été choisi est récent et aux normes environnementales actuelles. Fournir des solutions pour l'améliorer encore davantage et sur d'autres points (impact environnemental des parois, limitation du coût global,...) représente donc un challenge important. Ceci a cependant l'avantage de fournir des résultats qui seront pertinents et adaptés pour une grande majorité de nouvelles constructions. En se basant sur un cas d'étude en retard techniquement sur ce qui se construit aujourd'hui, les recommandations qui auraient été faites n'auraient probablement pas permis d'apporter des améliorations significatives par rapport au standard actuel.

Une première limitation de cette étude est le nombre et le type de scénarios testés. En comparant seulement six scénarios, il n'est pas possible de prendre en compte toutes les combinaisons envisageables des éléments individuels (pompe à chaleur, sur-isolation, toiture végétalisée,...) testés. Les choix effectués ont été justifiés mais d'autres solutions, non considérées, auraient pu être encore plus intéressantes. De plus, le besoin de pouvoir modéliser dans DesignBuilder les différents composants des scénarios choisis a également limité ce qu'il était possible de tester. Des composants mis en avant dans les études Step2Sport et dans le guide wallon sur les halls sportifs n'ont ainsi pas pu être évalués dans ce travail. C'est par exemple le cas de l'utilisation d'un système de cogénération ou encore d'un puit canadien. L'utilisation du programme Trnsys à la place de DesignBuilder-EnergiePlus aurait été nécessaire pour eux.

Une autre limitation de ce travail est qu'il est choisi de n'étudier que des mesures portant sur les parois, les systèmes et l'implantation. Ainsi, aucune modification de la structure en béton du bâtiment n'est étudiée. Vu le nombre limité de scénarios qui allaient être étudiés, considérer trop de domaines d'intervention différents auraient rendu l'interprétation des résultats plus compliquée.

L'étude environnementale ne considère que l'impact du bâtiment sur le réchauffement climatique. L'évaluation des autres indicateurs n'était pas possible par manque de données fiables pour les évaluer. Il a donc été décidé de placer la qualité avant la quantité et de concentrer les efforts sur l'indicateur choisi, qui était celui qui correspondait le mieux aux objectifs du travail de par sa popularité.

Une dernière limitation forte de ce travail est qu'il n'est pas possible de prédire avec certitude l'avenir. Dans toutes les analyses réalisées, que ce soit pour le confort, les coûts globaux ou l'impact environnemental, des hypothèses ont dû être prises pour caractériser l'impact des années qui passent. Ainsi, pour le confort, il est supposé que le climat restera inchangé lors des 50 prochaines années et que les résultats annuels obtenus avec le fichier TMY seront répétés sur toute cette période. Pour les coûts

globaux et environnementaux, des facteurs d'évolution des coûts et des taux d'intérêts sont estimés sur base des évolutions observées sur les dernières années. Comme dans toute modélisation statistique, il y a un risque que les évolutions futures ne suivent pas exactement les prévisions faites. Les valeurs réelles différeront donc probablement des résultats obtenus dans ce travail. Cependant, puisque l'objectif est ici davantage de comparer des scénarios que les évaluer précisément, les variations potentielles par rapport aux hypothèses auront peu d'influence sur les résultats de la comparaison. Un paramètre qui viendrait à se comporter différemment de ses prévisions induira des modifications similaires à chacun des scénarios. L'impact sur la comparaison sera donc moindre et les recommandations faites toujours valides.

15.3. Implication et ouvertures

15.3.1. Utilisation des résultats

Les recommandations faites dans ce travail pourront directement aider des investisseurs et leurs architectes dans leur projet de construction d'infrastructures sportives indoors. Grâce à l'approche prise dans ce travail consistant à considérer leur point de vue, ils n'auront pas de mal à voir en quoi les différents scénarios, et en particulier ceux qui leur sont recommandés, peuvent leur être bénéfiques. Ils verront directement les gains économiques concrets qu'ils peuvent espérer et le confort qu'ils peuvent offrir à leur futurs "clients" en les choisissant. Ils verront également l'impact environnemental qu'ils évitent en réalisant l'investissement supplémentaire. Cet élément pourra les aider à vanter les atouts de leur projet afin d'obtenir une meilleure adhésion des pouvoirs publics et des citoyens par exemple.

15.3.2. Pistes pour prolonger ce travail

Diverses nouvelles études pourraient être réalisées sur base de ce travail. Il serait, par exemple, intéressant de considérer de nouveaux scénarios avec de nouveaux composants. Les options écartées dans ce travail à cause des limitations de DesignBuilder pourraient ainsi être considérées grâce à l'utilisation d'un autre programme. Outre la connexion d'un puit canadien à la ventilation et l'utilisation de cogénération/piles à combustible, des options déjà mentionnées, plusieurs autres composants pourraient être intéressants vu les résultats de ce travail. Ainsi, l'ajout de batteries pour stocker le surplus de la production photovoltaïque, l'utilisation d'une structure en bois ou encore l'utilisation de panneaux radiants pour le chauffage consistent également en des options pertinentes pouvant mener, au vu des résultats de ce tfe, à des gains importants aussi bien environnementaux qu'économiques. De plus, l'ajout de scénarios permettrait d'obtenir des recommandations plus précises basées sur davantage de données.

Il a été remarqué au travers de ce travail l'absence d'un benchmarking des performances énergétiques des halls sportifs en Belgique. Celui-ci serait pourtant de premier intérêt pour obtenir un point de vue global sur l'état de ce patrimoine bâti,

souvent vétuste, et ainsi permettre une meilleure compréhension par les concepteurs de nouveaux halls des particularités de ce type d'infrastructure. Ceci permettrait également de définir plus précisément certains paramètres utilisés dans les modélisations numériques de ces halls, comme les gains internes dus à l'activité physique des personnes.

Réaliser une étude sur les impacts environnementaux des différents scénarios considérés dans ce mémoire avec les six autres indicateurs principaux (ODP, AP, EP, POCP, ADP_éléments et ADP_combustibles fossiles⁴⁰) aurait également sa place. Les gains en termes de coûts environnementaux pourraient ainsi gagner en représentativité. Plus le nombre de données prises en compte sera grand plus pertinents seront les résultats finaux. Vu l'importance qu'a le respect de l'environnement aujourd'hui, il est certain qu'une étude poussée portant uniquement sur cet aspect serait la bienvenue.

Enfin, il serait intéressant de réaliser le même genre d'étude pour d'autres types d'infrastructures sportives. Il serait ainsi particulièrement pertinent d'étudier le cas des piscines publiques qui sont responsables de grandes consommations énergétiques. Pour celles-ci, le travail de Step2Sport pourrait à nouveau être exploité et en particulier les pistes de réflexions qu'ils donnent pour ce type d'établissement.

Le sujet de la qualité environnementale des bâtiments et de leur impact sur tout leur cycle de vie est en pleine expansion. Il est donc certain que les études de ce genre ont de l'avenir et que des améliorations toujours plus importantes seront recherchées. Ce travail a pour volonté de porter sa pierre à cet édifice.

⁴⁰ Ces indicateurs correspondent aux indicateurs repris à la Table 2.02, à l'exception de GWP qui a déjà été mis en œuvre dans ce travail.

16. Conclusion

Ce mémoire a commencé par la pose d'une problématique. Celle-ci partait d'un double constat. Tout d'abord le réchauffement climatique actuel requiert des mesures rapides et dans tous les secteurs pour éviter des dégâts irréversibles à nos écosystèmes. Parmi les différents secteurs, celui des infrastructures sportives est considéré non-négligeable (Step2Sport, 2017). Ensuite, la plupart des clubs de sport ont des finances très limitées et donc des difficultés à financer des infrastructures adaptées, en particulier des infrastructures indoors (AISF, 2019). Ces salles sont cependant nécessaires pour assurer la qualité des entraînements lorsque les conditions climatiques ne permettent pas de les faire en extérieur.

Dans ce travail il a donc été cherché à déterminer comment rendre ces salles plus durables sans en augmenter excessivement le coût d'investissement. Le confort des usagers devait évidemment être maintenu. Pour ce faire, une approche par scénario a été utilisée. Six scénarios ont été définis et étudiés. Chacun de ces scénarios est constitué d'une série de mesures visant à diminuer l'impact environnemental d'un cas d'étude. Ces mesures ont été tirées de la littérature et combinées de sorte à permettre d'obtenir des réponses aux questions de recherche exprimées dans la Section 2 État de l'art. Ainsi, trois des scénarios ne comprennent que des mesures portant sur les parois, un uniquement sur les systèmes et les deux derniers ont des mesures portant sur les deux. Les analyses menées ont effectivement permis d'amener des réponses aux questions posées.

Ainsi, la première cherchait à savoir quelles mesures environnementales étaient les plus intéressantes à prendre dans le cas d'un hall sportif. Les gains possibles étaient également recherchés. Après réalisation des études de coût, d'impact environnemental et du confort, il est obtenu que les trois scénarios les plus avantageux selon ces trois critères sont, du meilleur au moins bon: le scénario recourant à une installation photovoltaïque, à l'ajout de vitrages et à un enfouissement partiel, suivi du scénario limité aux modifications des techniques avec l'ajout d'une installation photovoltaïque et d'une pompe à chaleur géothermique et enfin le scénario prévoyant une sur-isolation à base de matériaux bio-sourcés et un ajout de vitrages. Les gains avec le meilleur d'entre eux sont de -28,6% des coûts environnementaux, -5,7% des coûts économiques globaux et un indicateur de surchauffe en baisse de 24% par rapport au cas d'étude.

La deuxième question cherchait à savoir s'il est plus rentable, économiquement et écologiquement, d'investir dans les systèmes ou dans les parois. A la sortie de l'étude, aucun type de scénarios ne ressort de manière spécifique. Le top trois étant constitué de scénarios de type différent, il est conclu que le choix des mesures incluses dans le scénario et leur combinaison entre elles est ce qui importe. Des gains mutuels sont à rechercher. Un point commun entre les trois scénarios les plus performants selon cette étude est leur baisse de prélèvement électrique depuis le réseau. Toute mesure permettant celle-ci se montrerait donc particulièrement performante dans le cas d'un hall sportif.

La troisième et dernière question de recherche portait sur l'avantage d'utiliser des isolants bio-sourcés plutôt que synthétiques. Ces derniers permettent des résultats plus performants lors des analyses de coût et de confort. Les gains environnementaux sur l'entièreté du cycle de vie (considéré de 50 ans) sont cependant plus importants avec les isolants bio-sourcés.

Finalement, il est intéressant de noter que, bien que le cas d'étude respecte les normes actuelles, il est toujours possible de faire mieux aussi bien sur un plan environnemental que économique ou selon le confort. De plus, les normes actuelles ne consistent pas en un optimum économique. Il semble ainsi certain que ce sujet sera encore d'actualité pour un long moment. C'est d'ailleurs l'avis de grands patrons comme Bernard Delvaux (Sonaca). Celui-ci quitte l'entreprise d'aéronautique pour se lancer sur le marché de la construction, attiré par la "propension à la dépense pour rénover le bâti de manière plus environnementale, plus respectueuse" (Renette, 2021). Des efforts importants du secteur du bâtiment sont nécessaires pour ralentir le réchauffement climatique et préserver la vie de nos éco-systèmes. Il est primordial d'agir dès aujourd'hui en traduisant en actions les ambitions européennes. Pour clôturer ce travail, citons Antoine de Saint-Exupéry:

“Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir, mais de le rendre possible”

Antoine de Saint-Exupéry

G. Références

APERe (2018). *Hypothèses et méthodologie*. Association pour la promotion des énergies renouvelables (APERe). Disponible sur: http://www.apere.org/sites/default/files/OBS_Hypothèses_Methodologie_0.pdf Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

APERe (2021). *Observatoire des prix de l'énergie - Evolution des prix*. Association pour la promotion des énergies renouvelables (APERe). Disponible sur: <http://apere.org/fr/observatoire-prix> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

ABEX (2021). *Indice ABEX*. Association Belge des Experts (ABEX). Disponible sur: <https://www.abex.be/fr/indice-abex/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Accili, A. (2016). *Natural ventilation strategies for nearly-Zero Energy Sports Halls - Master Thesis*. KTH School of Industrial Engineering and Management. Disponible sur: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1071089&dsid=-5340> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Accili, A., Ortiz, J. & Salom, J. (2016). *Energy strategies to nZEB sports hall*. Conference proceedings EuroSun 2016 11-14 October - ISES.

Ahmed, K., Kurnitski, J. & Olesen, B. (2017). *Data for occupancy internal heat gain calculation in main building categories*. Sustainable Cities and Society, 35, 134-144. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340917305565> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

AISF (2019). *Cahier de revendications du sport francophone*. Association Interfédérale du Sport Francophone (AISF). Disponible sur: <https://aisf.be/revendications2019/> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Allacker, K. (2010). *Thèse doctorale - Sustainable building The development of an evaluation method*. K.U. Leuven. Disponible sur: https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS1713941&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSiteMap=1 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Aquino, I. & Nawari, N. (2015). *Sustainable Design Strategies for Sport Stadia*. Suburban Sustainability, 3, article 3.

Belga (2020). *Le gaz connaît une chute historique de ses prix avec la crise du Covid-19*. RTBF. Disponible sur: https://www.rtbef.be/info/economie/detail_le-gaz-connaît-une-chute-historique-de-ses-prix-avec-la-crise-du-covid-19?id=10519023 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Belga (2021). *Les nouvelles centrales à gaz devront se passer d'énergie fossile*. RTBF. Disponible sur: https://www.rtbef.be/info/economie/detail_les-nouvelles-centrales-a-gaz-devront-se-passer-d-energie-fossile?id=10762120&backUrl=rtbf%3A%2F%2Fopenapp Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Bouchaud, F. (2021). *L'Europe annonce un objectif climat moins ambitieux qu'il n'y paraît*. Natura-Sciences. Disponible sur: <https://www.natura-sciences.com/environnement/objectif-climatique-europe-pas-si-ambitieux.html> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

BPIE (2013). *Implementing the cost-optimal methodology in EU countries - Lessons learned from three case studies*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Disponible sur: <https://www.bpie.eu/publication/implementing-the-cost-optimal-methodology-in-eu-countries/> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

BPIE (2020). *A guidebook to european building policy key legislation and initiatives*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE). Disponible sur: https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2020/08/BPIE_Guide-on-Building-Policy_Final.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Brett Martin (2021). *Marlon Clickfix 1040 fiche technique*. Brett Martin. Disponible sur: <https://www.brettmartin.com/en-gb/daylight-systems/products/panel-glazing/marlon-clickfix-1040.aspx> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Bruxelles environnement (2021). *Une toiture verte: un coin de verdure dans la ville*. Bruxelles environnement. Disponible sur: https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20Eco%20construction%20TER02%20Part%20FR Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Bruxelles environnement (2020). *Vademecum travaux PEB 2020 - Partie 9 : méthodes de calcul*. Bruxelles environnement. Disponible sur: https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/Vademecum_Travaux_PEB_2020_-_Partie_9.pdf?_ga=2.239978371.1608269175.1622401261-603406492.1622401261 Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Circular ecology (2021). *Embodied Carbon - The ICE Database (Download)*. Circular ecology. Disponible sur: <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Climate.onebuilding (2021). *Repository of free climate data for building performance simulation*. Climate.onebuilding. Disponible sur: http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/BEL_Belgium/index.html Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Commission européenne (2021a). *2030 climate & energy framework*. European Commission. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Commission européenne (2021b). *Paris Agreement*. European Commission. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Commission européenne (2014). *Press release - 2030 climate and energy goals for a competitive, secure and low-carbon EU economy*. European Commission, Brussels, 22 January 2014. Disponible sur: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_14_54 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

CREG (2021). *Comment est composé le prix de l'énergie?*. Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG). Disponible sur: <https://www.creg.be/fr/consommateurs/prix-et-tarifs/comment-est-compose-le-prix-de-lenergie> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Ecoinvent (2021). *Organisation*. Ecoinvent. Disponible sur: <https://www.ecoinvent.org/about/organisation/organisation.html> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Eiffage (2015). *Un centre sportif de haut niveau pour Louvain-la-Neuve*. Eiffage. Disponible sur: <https://www.eiffageconstruction.com/medias/actualites/un-centre-sportif-de-haut-niveau-pour-louvain-la-neuve> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

EMB (2017). *FDES panneau sandwich de bardage à âme PUR/PIR. Enveloppe Métallique du Batiment (EMB)*. 17p. Disponible sur: <https://api.clfj5-jorisiden1-p1-public.model-t.cc.commerce.ondemand.com/medias/FDES-PS-Bardage-PUR-PIR-100-220mm.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8ODMyNDh1fGFwGxpY2F0aW9uL3BkZnNoZDIvaDEzLzg4Mjk3ODkzNzI0NDYyRkRfU19QU19CYXJkYWdlX1BVUI9QSVJfMTAwXzlyMG1tLnBkZnNoYmE5YmY4YjEwNjNmM2ZjMmQyY>

zE5ZjA5Njk3MjNhMWNIMzZINGEyY2ZjOGExMmQ1YWVlYjk5ZTI5ODQ2NTQz Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

EN 12193 NBN (2019). *Lumière et éclairage - éclairage des installations sportives*. Bureau de normalisation.

EN 15804 NBN (2019). *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*. Bureau de normalisation.

EN 15978 NBN (2012). *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. Bureau de normalisation.

EN 15459-1 NBN (2017). *Performance énergétique des bâtiments - Procédure d'évaluation économique des systèmes énergétiques des bâtiments - Partie 1 : Méthode de calcul, Module M1-14*. Bureau de normalisation.

Energieplus (2007a). *Emissions de polluants liée à la consommation énergétique*. Energieplus. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/les-emissions-de-polluants-liee-a-la-consommation-energetique/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Energieplus (2007b). *Les 6 paramètres traditionnels du confort thermique*. Energieplus. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Energieplus (2010). *Prédimensionner l'installation photovoltaïque*. Energieplus. Disponible sur: <https://energieplus-lesite.be/concevoir/photovoltaique/predimensionner-l-installation/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Energuides (2021). *À quoi correspond une tonne de CO2 ?*. Energuides (Sibelga). Disponible sur: <https://www.energuides.be/fr/questions-reponses/a-quoi-correspond-une-tonne-de-co2/2141/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

European Environment Agency (2020). *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation*. European Environment Agency. Disponible sur: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-6#tab-googlechartid_googlechartid_chart_111_filters=%7B%22rowFilters%22%3A%7B%7D%3B%22columnFilters%22%3A%7B%22pre_config_date%22%3A%5B2018%5D%7D%3B%22sortFilter%22%3A%5B%22u_geo_reversed%22%5D%7D Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Furmanek, M. & Zima, K. (2015). *Analysis of a passive design sports hall: construction and use*. Technical transactions civil engineering, 112:4, 165-173.

Gibson, F., Lloyd, J., Bain, S. & Hottell, D. (2008). *Green design and sustainability in sport and recreation facilities*. The SMART Journal, 4:2, 26-33.

Guide bâtiment durable (2016). *Dossier - Réaliser des toitures vertes*. Guide bâtiment durable Brussels. Disponible sur: <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/reglementation-et-normes.html?IDC=5054> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Hammond, G. & Jones, C. (2008). *Embodied energy and carbon in construction materials*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy, 161:2, 87-98.

Hammond, G. & Jones, C. (2011). *Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*. University of Bath - BSRIA. Disponible sur: <https://greenbuildingencyclopaedia.uk/wp-content/uploads/2014/07/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Hirschland, T. (2021). Lesuco S.A.. *Communication personnelle par e-mail portant sur les différentes option pour la réalisation du revêtement de sol d'un hall d'athlétisme indoor.*

Horel, T. (2020). *Le prix de l'électricité chute : faut-il changer de fournisseur ?*. RTBF. Disponible sur: https://www.rtf.be/info/societe/onpdp/detail_le-prix-de-l-electricite-chute-faut-il-changer-de-fournisseur?id=10471527 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

IBU (2014). *Environmental product declaration - Pavatex*. Institut Bauen und Umwelt (IBU). Declaration number EPD-PAV-2014197-CBG1-EN. Disponible sur: www.bau-umwelt.com/https://epd-online.com Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

IBU (2018). *Environmental product declaration - Pfeifer*. Institut Bauen und Umwelt (IBU). Declaration number EPD-SHL-20180035-IBG1-EN. Disponible sur: www.bau-umwelt.com/https://epd-online.com Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

IBU (2019). *Environmental product declaration - Unilin*. Institut Bauen und Umwelt (IBU). Declaration number EPD-UNI-20140123-IBA1-EN . Disponible sur: www.bau-umwelt.com/https://epd-online.com Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

ISO 8996 NBN EN (2004). *Ergonomie de l'environnement thermique - détermination du métabolisme énergétique*. Bureau de normalisation.

ISO 15927-4 BS EN (2005). *Hygrothermal performance of buildings - Calculation and presentation of climatic data - Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling*. BSI.

ISO 18523 (2016). *Energy performance of buildings - Schedule and condition of building, zone and room usage for energy calculation*. ISO.

Isopan (2021). *Green Roof*. Isopan. Disponible sur: <https://isopan.com/prodotti/green-roof/> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Jamoye, V. (2021). Coretec Energy. *Communication personnelle par e-mail relative au frais d'injection d'un surplus photovoltaïque sur le réseau.*

Jones, C. (2019). *Event ASBP green 24th october 2019 - Embodied Carbon - Updating the ICE Database. Circular ecology*. Disponible sur: <https://asbp.org.uk/wp-content/uploads/2019/10/ASBP-Green-Register-24th-Oct-19-3.-Craig-Jones-Circular-Ecology.pdf> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Jorisode (2021). *Panneaux isolants*. Jorisode - Solabel. Disponible sur: <https://solabel.be/images/pdf/panneau-sandwich-metallique-isolant-jorisode-brochure.pdf> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Karibati (2018). *Le carbone biogénique et les matériaux biosourcés*. Build Green. Disponible sur: https://www.build-green.fr/le-carbone-biogenique-et-les-materiaux-biosources/?doing_wp_cron=1618051002.4842340946197509765625 Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Kellison, T.B. & Hong, S. (2015). *The adoption and diffusion of pro-environmental stadium design*. European Sport Management Quarterly, 15:2, 249-269.

Kreusch, S. (2021). *Temps unitaires moyens*. Cours de planification des chantiers 2019 à l'université de Liège - Master ingénieur civil architecte. inédit. 18p.

Kuronuma, T., Watanabe, H., Ishiara, T., Kou, D., Touda, K., Ando, M. & Shindo, S. (2018). *CO2 Payoff of Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species*. Sustainability, 10, article 2256.

Labat, M. & Attonaty, K. (2018). *Numerical estimation and sensitivity analysis of the energy demand for six industrial buildings in France*. *Journal of building performance simulation*, 11:2, 223-240.

LTS (2021). *Les panneaux de CLT étanches à l'air dès 3 couches*. Laminated timber solution. Disponible sur: <https://www.laminatedtimbersolutions.be/fr/blog/etanche-a-l-air-avec-le-clt> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

LBFA (2021). *Infrastructure*. Ligue belge francophone d'athlétisme (LBFA). Disponible sur: <http://www.lbfa.be/web/infrastructure> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Markclimate (2014). *Belgique Catalogue de produits et de prix*. Markclimate. Disponible sur: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

MasterWindow (2021). *Air Change Rate Calculator*. Window Master. Disponible sur: <https://www.windowmaster.com/resources/calculators/air-change-rate-calculator/> Consulté pour la dernière fois le 3 juin 2021.

Matriciel (2011). *Guide de conception énergétique des halls de sport*. Service public de wallonie - Infrasport. Disponible sur: https://infrastructures.wallonie.be/files/PDF/POUVOIR%20LOCAL/1%20SUBSIDES/1%201%20Infrasports/expertise-bao-aide%20conception/Guide_halls_des_sports.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Ministère de la transition écologique (2018). *Changement climatique : causes, effets et enjeux*. Ministère de la transition écologique. Disponible sur: <https://www.ecologie.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Moha (2021). *Histoire de Mons Obourg Hainaut Athlétisme*. Mons Obourg Hainaut Athlétisme. Disponible sur: <https://mohathle.be/?id=4> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Nizetic, S. (2018). *Design scenarios for renovation of sports complex: a case study*. *International Journal of Sustainable Energy*, 37:2, 105-114.

Nord, N., Martin Mathisen, H. & Cao, G. (2015). *Energy cost models for air supported sports hall in cold climates considering energy efficiency*. *Renewable Energy*, 84, 56-64.

OVAM (2018). *Annex: Monetisation of the MMG method (update 2017)*. OVAM. Disponible sur: <https://www.totem-building.be> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Pfeifer (2020). *CLT cross laminated timber*. Pfeifer. Disponible sur: <https://www.pfeifergroup.com/fr/telechargements/informations-produits/> Consulté pour la dernière fois le 3 juin 2021.

Pil Lee, S., Cornwell, T.B. & Babiak, K. (2013). *Developing an Instrument to Measure the Social Impact of Sport: Social Capital, Collective Identities, Health Literacy, Well-Being and Human Capital*. *Journal of Sport Management*, 27, 24-42.

Pitarch, A., José Rua, M., Reig, L. & Arin, I. (2020). *Contribution of Roof Refurbishment to Urban Sustainability*. *Sustainability*, 12, article 8111.

PLAN (2021). *Budget économique 2021 - Annexe statistique*. Bureau fédéral du Plan. Disponible sur: <https://www.plan.be/databases/PVarModal.php?lang=fr&VC=MODKERN&DB=MOD&XT=1> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Polyverts (2021). *Temps unitaires pour études de prix*. Polyvert. Disponible sur: <https://polyvert.iutrs.unistra.fr/liste-de-temps-unitaires-pour-etudes-de-prix/> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Porsche, U. & Köhler, M. (2014) *Life Cycle Costs of Green Roofs: A Comparison of Germany, USA, and Brazil*. RIO 3 - World Climate & Energy Event, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil. 461-467, Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/246686427_Life_Cycle_Costs_of_Green_Roofs_A_Comparison_of_Germany_USA_and_Brazil?enrichId=rgreq-e583637f437b29a94c71cf80ca12a358-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzI0NjY4NjQyNztBUzoxNzI4Nzg3NTAyOTgxMTJAMTQxODlyODkxNDYxNA==&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Reiter, S. (2010). *Life Cycle Assessment of Buildings – a review*. Proceedings of ArcelorMittal International Network in Steel Construction 2010 : Sustainability Workshop. Disponible sur: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/96541/1/Paper-Reiter-2010.pdf> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Renette, E. (2021) *Article du journal Le Soir du 5 juin 2021 - Bernard Delvaux: "Changer n'est pas un problème, c'est un besoin"*. Le Soir.

Renier, T. (2021). Coordinateur de la régie communale autonome d'Hannut. *Communication personnelle par e-mail: réception des plans et du rapport PEB du hall sportif (athlétisme) d'Hannut*. inédit.

Scailquin, E. (2020). Mons Obourg Hainaut Athlétisme (MOHA). *Communication personnelle par téléphone relative à la salle d'athlétisme du club de Mons (MOHA)*.

Selectra (2021). Evolution du prix du gaz. Fournisseur-gaz by selectra. Disponible sur: <https://www.fournisseurs-gaz.com/prix/evolution-gaz> Consulté pour la dernière fois le 2 juin 2021.

SimaPro (2021). *Ecoinvent LCI database*. Simapro. Disponible sur: <https://simapro.com/databases/ecoinvent/> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Soprema (2021). *Pavatherm (fiche technique)*. Pavatex-Soprema. Disponible sur: <https://www.soprema.fr/fr/product/isolation/toiture/toiture-en-pente/sarking-climat-de-plaine/pavatherm> Consulté pour la dernière fois le 3 juin 2021.

SPW (2015). *Isolation périphérique des planchers en contact avec le sol*. Service public de Wallonie. Disponible sur: https://energie.wallonie.be/fr/06-07-isolation-peripherique-des-planchers-en-contact-avec-le-sol.html?IDC_PEB=9491&IDD=113626&IDC=9093 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

SPW (2016a). *Annexe C3 – Annexe VHN*. Service public de Wallonie. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/agw-150514-annexe-c3-vhn-fr-2016.pdf?ID=41800> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

SPW (2016b). *Débit de fuite par unité de surface v50*. Wallonie énergie SPW. Disponible sur: https://energie.wallonie.be/fr/08-03-debit-de-fuite-par-unite-de-surface-v50.html?IDC_PEB=9491&IDD=113678&IDC=9095 Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

SPW (2021). *Installer un système photovoltaïque : aspects pratiques*. Wallonie énergie. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/installer-un-systeme-photovoltaïque-aspects-pratiques.html?IDC=6185&IDD=11709> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.

Step2Sport (2015a). *Roadmap towards nearly Zero Energy Sport Buildings*. Step2Sport. Disponible sur: http://step2sport.eu/sport/wp-content/uploads/2016/02/WP3_20151130_STEP2SPORT_D3.1Roadmap_PU.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Step2Sport (2015b). *D2.2. Integrated report - Energy audits and Energy Performance Certification*. Step2Sport. Disponible sur: http://step2sport.eu/sport/wp-content/uploads/2015/09/WP2_20150612_2_STEP-2-SPORT_D2-2_Integrated_report.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

- Step2Sport (2017a). *Final publishable report*. Step2Sport. Disponible sur: http://step2sport.eu/sport/wp-content/uploads/2017/04/FINAL_PUBLISHABLE_REPORT.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.
- Step2Sport (2017b). *State of the art of Energy Performance Certification in EU sport buildings*. Step2Sport. Disponible sur: http://step2sport.eu/sport/wp-content/uploads/2015/06/State_of_the_art_of_EPC_sport_buildings_Publishable-Report.pdf Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.
- Suman, N., Marinic, M. & Kuhta, M. (2020). *A Methodological Framework for Sustainable Office Building Renovation Using Green Building Rating Systems and Cost-Benefit Analysis*. Sustainability, 12, article 6156.
- Sypemi (2018). *Guide Durée de vie conventionnelle des biens/ des équipements*. Sypemi. Disponible sur: <https://www.fedene.fr/wp-content/uploads/sites/2/2018/05/SYPEMI-GUIDE-DUREE-DE-VIE-CONVENTIONNELLE-BIENS-EQUIPEMENTS-vf.pdf> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.
- Takano, A., Winter, S. & Hughes, M. (2014). *Comparison of life cycle assessment databases for building assessment*. ResearchGate. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/276286993_Comparison_of_life_cycle_assessment_databases_for_building_assessment Consulté pour la dernière fois le 3 juin 2021.
- Unilin (2021). *Utherm concrete*. Unilin. Disponible sur: <https://www.unilininsulation.com/en/wall-insulation/utherm-concrete/utherm-concrete-k> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.
- UN.org (2021). *La crise climatique - Nous pouvons gagner la course*. Nations unies (UN). Disponible sur: <https://www.un.org/fr/un75/climate-crisis-race-we-can-win> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.
- UPA (2020). *Bordereau des prix unitaires, 60e édition*. Union professionnelle d'architectes (UPA).
- VAL (2021). *Vind een club*. Vlaams atletiek liga (VAL). Disponible sur: <http://www.atletiek.be/organisatie/vind-een-club> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.
- Vanndoooren, O. (2006). *Les toitures vertes*. Centre scientifique et technique de la construction (CSTC). Disponible sur: https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=agenda&doc=Toitures_vertes_CCW_CSTC.pdf Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.
- Veko (2019). *Magnus sport led*. Veko. Disponible sur: https://veko.be/images/documentation/products/Magnus-sport/FR/Magnus_Sport_LED.pdf Consulté pour la dernière fois le 6 juin 2021.
- Viessmann (2014). *Vitovolt 300*. Viessmann. Disponible sur: <https://www.viessmann.be/fr/chauffage-batiments-residentiels/photovoltaique/module-photovoltaique/vitovolt-300.html> Consulté pour la dernière fois le 6 juin 2021.
- Viessmann (2015). *Notice pour l'étude*. Viessmann. Disponible sur: <https://www.viessmann.be/fr/chauffage-batiments-residentiels/pompe-a-chaaleur/grande-puissance/vitocal-350-g-pro.html> Consulté pour la dernière fois le 4 juin 2021.
- WMO (2019). *Global Climate in 2015-2019: Climate change accelerates*. World Meteorological Organization (WMO). Disponible sur: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/global-climate-2015-2019-climate-change-accelerates> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.
- WMO (2021). *New climate predictions increase likelihood of temporarily reaching 1.5 °C in next 5 years*. World Meteorological Organization (WMO). Disponible sur: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/new-climate-predictions-increase-likelihood-of-temporarily-reaching-15-c-next-5> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

H. Annexes

Table des annexes		
Annexe 1	Résultats de l'étude sur la ventilation naturelle dans les halls sportifs de Accili (2016)	Page xvi
Annexe 2	Planning complet de l'activité dans le cas d'étude	Page xvii
Annexe 3	Principaux postes considérés pour les études économiques et environnementales	Page xviii
Annexe 4	Fichier Excel utilisé pour les études économiques et environnementales	Fichier joint

Annexe 1 - Résultats de l'étude sur la ventilation naturelle dans les halls sportifs de Accili (2016)

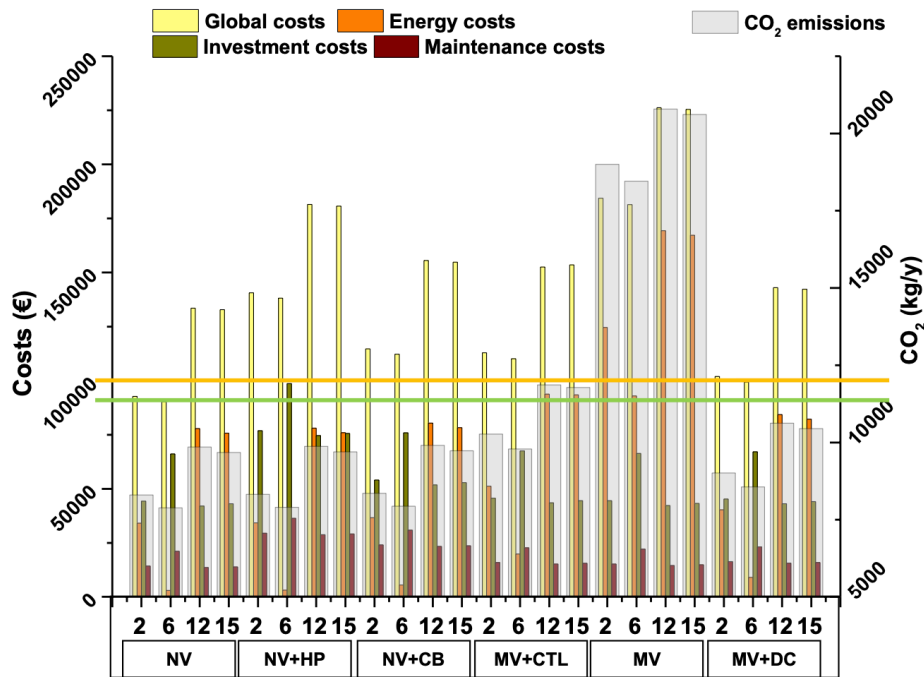


Figure 51. Cost-optimal analysis results. Orange line: lowest global costs level including heating system. Green line: lowest global cost level without heating system

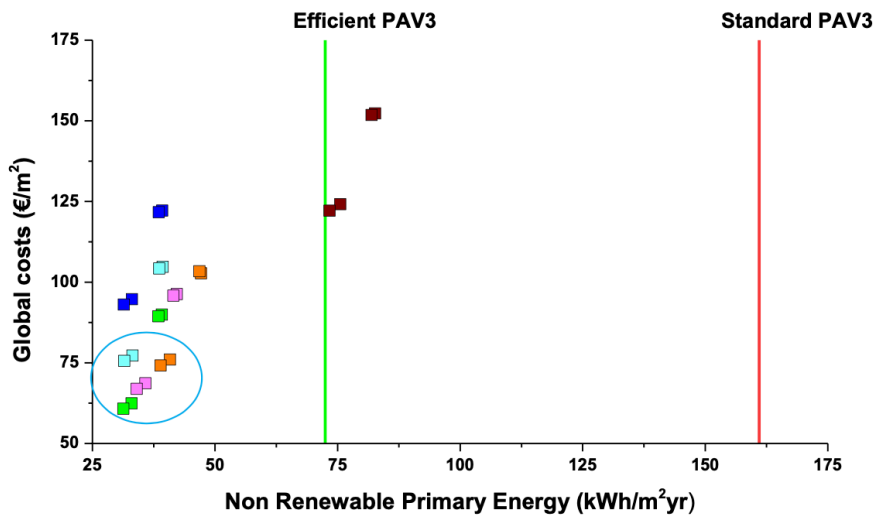


Figure 52. Cost-energy evaluation: not renewable primary energy consumption vs. global cost over 20 years. Color map: green: natural ventilation without heating system; light blue: natural ventilation with condensing boiler; blue: natural ventilation with heat pump; orange: mechanical ventilation with control; pink: mechanical ventilation with variable speed fan; dark red: mechanical ventilation without control. Light-blue circle: PV2 and PV6 configurations

Figures 51 et 52 issues des pages 82 et 83 de sa thèse de master.

Accili, A. (2016). *Natural ventilation strategies for nearly-Zero Energy Sports Halls - Master Thesis*. KTH School of Industrial Engineering and Management. Disponible sur: <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1071089&dswid=-5340> Consulté pour la dernière fois le 5 juin 2021.

Annexe 2 - Planning complet de l'activité dans le cas d'étude

Paramètre	Valeur	Base
Jours d'occupation	365 jours	Calendrier
Ventilation	22 m ³ /hpers	Occupation
Gains internes - éclairage	0,8 W/100lux	Éclairage
Gains internes - activité	135 W	Occupation*facteur correcteur (0,55)
Habillement	été: 0,4 clo; hiver: 0,5 clo	Occupation*facteur correcteur (0,55)

Planning - Semaine (lundi > vendredi)

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
T° consigne (°C)	14	14	14	14	14	14	14	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	14	14	
Éclairage (Lux)	0	0	0	0	0	0	0	0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	0	0	
Occupation (pers/m ²)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0	0

Planning - Weekend

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
T° consigne (°C)	14	14	14	14	14	14	14	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	14	14	
Éclairage (Lux)	0	0	0	0	0	0	0	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	0	
Occupation (pers/m ²)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0	0

Planning - vacances

Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
T° consigne (°C)	14	14	14	14	14	14	14	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	14	14
Éclairage (Lux)	0	0	0	0	0	0	0	0	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	0	0
Occupation (pers/m ²)	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0

Nom	Début	Durée	Nom	Début	Durée
Congé de détente	16 février	7 jours	Congé d'automne	27 octobre	7 jours
Vacances de printemps	5 avril	14 jours	Vacances d'hiver	22 décembre	14 jours
Vacances d'été	1 juillet	62 jours			

Annexe 3 - Principaux postes considérés pour les études économiques et environnementales

Pour le cas d'étude:

Postes	Éléments principaux	Durée de vie
Structure	Colonnes béton	100
	Poutres béton	100
	Voile béton (sous-bassement)	50
	Dalle sol	100
	Fondations	100
	Terrassement et remblais	/
	Tirants (contreventement)	50
	Poutres métalliques	50
Techniques	CTA	20
	Conduites et grilles air	30
	Aérothermes + fixations	15
	Conduites gaz	30
	Protection incendie et alarme	25
	Drainage périphérique	50
	Évacuation des eaux de pluie	30
	Système électrique	40
Parois	Panneaux sandwich	50
	Isolant périphérique	50
	Polycarbonate	30
	Chassis	30
	Portes vitrées	30
	Issues de secours	30
	Porte garage	30
	Revêtement de sol athlétisme	15
	Exutoires de fumée	30
	Davantage de détails et les informations relatives aux scénarios sont disponibles dans le fichier Excel joint	