

Travail de Fin d'Etudes : Rénovation énergétique de bâtiments tertiaires

Auteur : Hovsepyan, Ani

Promoteur(s) : Lemort, Vincent; Marique, Anne-Françoise

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9032>

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.

RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DE BÂTIMENTS TERTIAIRES

Cas d'étude : Institut de Botanique bâtiment B22

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

Année académique 2019-2020

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées

Président du Jury : Pierre LECLERCQ

Promoteurs : Vincent LEMORT et Anne-Françoise MARIQUE

Jury : Philippe ANDRE, Kevin SARTOR et Nicolas PAULUS

REMERCIEMENTS

Je remercie mon promoteur monsieur Vincent Lemort pour sa disponibilité, ses conseils et le sujet de mon travail, un sujet qui m'a permis d'acquérir de l'apprentissage, non seulement dans le domaine de mes études, mais également au-delà. Je remercie également ma promotrice Anne-Françoise Marique pour ses conseils.

Je remercie les membres de mon jury, messieurs Philippe André et Nicolas Paulus pour le temps consacré à la lecture de ce travail et plus particulièrement monsieur Kevin Sartor pour le temps qu'il m'a consacré et les informations qu'il m'a fournies.

Je remercie monsieur Frédéric Ransy pour les informations et son temps. Je remercie chaleureusement messieurs Xavier Fettweis et Sébastien Doutreloup pour les données climatiques, leurs conseils avisés et, surtout, le temps qu'ils m'ont accordée.

Et enfin et surtout, je remercie ma famille et mes amis qui m'ont soutenue pendant ces cinq années d'études.

RÉSUMÉ

Au vu des problématiques actuelles liées au changement climatique, la rénovation de bâtiments anciens constitue un enjeu essentiel dans la lutte contre le réchauffement climatique, une problématique qui a bouleversé la société et remis en cause la façon de vivre de la population. La majorité de ces bâtiments ayant été construits avant la mise en place des premières normes concernant les performances énergétiques, c'est dans ce patrimoine que réside un potentiel d'économie d'énergie. Une partie non négligeable des constructions anciennes est destinée à l'activité d'apprentissage. L'amélioration de l'efficacité énergétique de ces bâtiments est, non seulement pertinente pour la remise à neuf du bâti à caractère patrimonial, mais aussi et surtout pour les utilisateurs. Occupé par des étudiants, ce type d'établissement requiert un niveau de confort thermique et une qualité de l'air intérieur élevée. Les bâtiments historiques nécessitent une grande quantité d'énergie pour créer des conditions de confort acceptables. Cette utilisation, bien que local de bâtiments inefficaces en termes d'énergie pourrait avoir des effets mondiaux. Ces problèmes deviennent alors globaux, notamment lorsqu'ils ne sont pas empêchés. Par ailleurs, il est impératif de réduire cette consommation d'énergie, cause d'émissions de gaz à effet de serre.

C'est dans ce contexte que certains bâtiments de l'Université de Liège ont fait l'objet d'une rénovation énergétique, où l'enjeu majeur était de rénover sans occulter leur potentiel patrimonial. La rénovation du bâtiment B22 de l'Institut de Botanique a permis de relever ce défi en démontrant qu'il était possible de concilier une rénovation énergétique et la préservation des valeurs patrimoniales et architecturales.

Ce travail s'est attardé sur le cas de ce bâtiment rénové en 2018. L'objectif premier est de mesurer l'impact de cette rénovation sur le bâtiment. Deux modèles de simulation dynamique du bâtiment ont été développés dans le logiciel DesignBuilder. Un premier représentant le bâtiment avant la rénovation et, un second, pour le bâtiment après rénovation. Les modèles ont ensuite été calibrés par les données disponibles sur la consommation du bâtiment dans le but de créer des modèles dont les résultats de consommation se rapprocheraient le plus possible de la réalité. Les objectifs d'une rénovation énergétique étant l'économie d'énergie, la diminution de l'impact du bâtiment sur l'environnement, et l'augmentation du confort des utilisateurs, les résultats seront étudiés suivant ces trois axes. De plus, la phase de recherche et d'étude ayant été financée par EEEF, un mode de financement mis en place par l'UE qui promeut une utilisation écologique de l'énergie, une diminution de la consommation d'énergie de minimum 20% a été exigée suite à sa participation à la politique 20/20/20 de l'Union Européenne. Les résultats permettront de vérifier si cette exigence est respectée.

Bien que des exigences aient été mises en place à l'échelle européenne et nationale pour diminuer les gaz à effet de serre, le réchauffement climatique est un fait. Des questions se posent quant à l'efficacité des systèmes mis en place dans le futur et à la suffisance de la rénovation entreprise aujourd'hui. Dans la seconde partie, l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment sera donc évalué suivant le scénario futur de changement climatique le plus pessimiste.

ABSTRACT

In view of the current problems linked to climate change, the renovation of old buildings constitutes an essential issue in the fight against global warming, a problem which has upset society and questioned the way of life of the population. The majority of these buildings having been constructed before the implementation of the first standards concerning energy performance, it is in this heritage that there is an opportunity for saving energy. A significant part of the old buildings is intended for the learning activity. Improving the energy efficiency of these buildings is not only relevant for the refurbishment of heritage buildings, but also for users. Occupied by students, this type of establishment requires a level of thermal comfort and high indoor air quality. Historic buildings require a large amount of energy to create acceptable comfort conditions. This local use of energy-inefficient buildings could have global effects, especially when they are not prevented. In addition, it is imperative to reduce this energy consumption, which causes greenhouse gas emissions.

In this context certain buildings of the University of Liège have been the subject of an energy renovation where the major challenge was to renovate without obscuring their heritage potential. The renovation of the B22 building of the Institute of Botany met this challenge by demonstrating that it was possible to reconcile energy renovation with the preservation of heritage and architectural values.

This paper focusses on the case of this building renovated in 2018. The primary objective is to measure the impact of this renovation on the building. Two dynamic building simulation models have been developed in the DesignBuilder software. The first one represents the building before renovation, and the second one, the building after renovation. The model was then calibrated by the available data on building consumption, in order to create models whose consumption results would be as close as possible to reality. The results will be studied according to the three objectives of energy renovation: saving energy, reducing the building's impact on the environment and increasing user comfort. In addition, since the research and study phase have been funded by EEEF, a funding method set up by the EU which promotes ecological use of energy, a reduction in energy consumption of at least 20% was required following its participation in European Union 20/20/20 policy. The results will make it possible to verify whether this requirement is met.

Although requirements have been put in place at European and local level to reduce greenhouse gases, global warming is a reality. Questions arise as to the effectiveness of the systems put in place in the future and the adequacy of the renovation undertaken today. In the second part, the impact of global warming on the building will therefore be assessed according to the most pessimistic future climate change scenario.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Table des matières	5
Table des figures	9
Table des tableaux	12
1. Introduction	13
1.1 Enjeux climatiques	14
1.1.1 Le réchauffement climatique en quelques chiffres	14
1.1.2 Causes du changement climatique	15
1.1.3 Cadre Mondial	17
1.1.4 Cadre Européen - politique climatique	18
1.1.5 Cadre wallon	19
2. Etat D'art	21
2.1 Rénovation énergétique	21
2.2 Mesure de l'impact climatique sur le bâtiment	22
2.3 Revue littéraire	24
2.3.1 Rénovation énergétique d'établissements scolaires	27
2.3.2 Impact du réchauffement climatique sur la rénovation	29
2.4 Scénarios de réchauffement climatique	31
3. Présentation du cas d'étude	34
3.1 Histoire du Sart Tilman	34
3.1.1 Campus	34
3.1.2 Architecture	34
3.2 L'institut de Botanique bâtiment B22	35
4. Objectifs	38
5. Méthodologie	39
5.1 Audit énergétique	39
5.2 Choix des logiciels	39
5.2.1 DesignBuilder	39
5.2.2 Mar	40
5.3 Rénovation énergétique et impact du réchauffement climatique sur le bâtiment	40

6. Etude du bâtiment	42
6.1 Etudes réalisées	42
6.2 Présentation du bâtiment	43
6.2.1 Affectation et occupation	43
6.2.2 Energies disponibles	44
Electricité	44
Gaz	45
Eau	45
6.3 Analyse de la situation avant rénovation	45
6.3.1 Enveloppe	45
Toiture	45
Dalle de sol	46
Murs extérieurs	47
Fenêtres	47
6.3.2 Eclairage	48
6.3.3 Chauffage	48
6.3.4 Production d'eau chaude sanitaire	49
6.3.5 Ventilation	49
6.3.6 Refroidissement	49
6.3.7 Air comprimé	49
6.4 Travaux de rénovation	50
6.4.1 Enveloppe	50
Toiture	50
Murs Extérieurs	50
Fenêtres	51
6.4.2 Eclairage	52
6.4.3 HVAC	52
6.4.4 Panneaux photovoltaïques	53
6.5 Analyse des consommations énergétiques	53
6.5.1 Electricité	53
6.5.2 Chaleur	56
7. Analyse des données climatiques	60
7.1 Données climatiques actuelles	60

7.2 Données climatiques Futures	61
8. Création des Modèles	63
8.1 Modèle I	63
8.1.1 Données météorologiques	63
8.1.2 Géométrie	63
8.1.3 Zonage	64
8.1.4 Données d'entrée et hypothèses	65
Activité	65
Construction	68
Ouvertures	68
Eclairage	68
Système HVAC	69
8.1.5 Calibration du modèle	70
8.2 Modèle II	75
8.2.1 Données météorologiques	75
8.2.2 Géométrie	75
8.2.3 Données d'entrée et hypothèses	76
Construction	76
Ouvertures	76
Eclairage	76
Système HVAC	77
Panneaux photovoltaïques	77
8.2.4 Calibration du modèle	77
9. Analyse des résultats	80
9.1 Consommation énergétique	80
9.1.1 Consommation d'électricité	80
9.1.2 Consommation de chaleur	81
9.1.3 Enveloppe du bâtiment	82
9.2 Rentabilité de la rénovation énergétique	82
9.3 Impact environnemental	84
9.4 Confort intérieur	85
9.4.1 Qualité de l'air	85
9.4.2 Confort thermique	86

9.5 Impact du réchauffement climatique sur le bâtiment rénové	88
9.5.1 Demande de chaud et de froid	88
9.5.2 Confort thermique	89
10. Conclusion	93
Bibliographie	96
Annexe 1 - Zonage	103
Annexe 2 - Données encodées dans l'onglet activité (Modèle 1)	106
Annexe 3 - Composition de l'enveloppe (Modèle 1)	107
Annexe 4 - Données encodées dans l'onglet éclairage (Modèle 1)	112
Annexe 5 - Données encodées dans l'onglet HVAC (Modèle 1)	113
Annexe 6 - Profil horaire de la consommation d'électricité sur plusieurs tableaux	114
Annexe 7 - Données encodées dans l'onglet éclairage (Modèle 2)	116
Annexe 8 - Données encodées dans l'onglet HVAC (Modèle 2)	117
Annexe 9 - Détail des calculs du temps de retour de l'argent investi dans les travaux	118
Annexe 10 - Profils de l'indicateur PPD	121

TABLE DES FIGURES

- Figure 1 - Illustration des tendances socio-économiques et du système Terre (Stevens & Servigne, 2013)
- Figure 2 - Graphe de l'évolution du nombre de catastrophes par an sur les différents continents (EM-DAT, 2020)
- Figure 3 - Graphe de l'évolution de la température moyenne annuelle mondiale en fonction du temps (CGDD, 2020)
- Figure 4 - Graphe de l'évolution de la différence de la température moyenne annuelle par rapport à la période de référence à Bruxelles en fonction du temps (IRM, 2020)
- Figure 5 - Graphiques de la croissance de gaz à effet de serre (Steffen et al., 2015)
- Figure 6 - Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial (pour l'année 2014) et de la Région wallonne (pour l'année 2016) (climat.be, s.d.)
- Figure 7 - Evolution des émissions de gaz à effet de serre des différents secteurs de 1990 à 2018 (climat.be, s.d.)
- Figure 8 - Package 2020 et 2030 de la Commission européenne (Gouvernement Wallon, 2017)
- Figure 9 - Consommation énergétique du secteur tertiaire en Wallonie (SPW DGO4, s.d.)
- Figure 10 - Répartition des bâtiments en fonction de leur date de construction en Belgique (Statbel, 2019)
- Figure 11 - Représentation simplifiée d'une courbe d'optimisation des coûts pour la rénovation d'une habitation (cas d'une maison de maître étudié par l'Agence flamande de l'énergie en 2013) (Vrijders et Loncour, 2016)
- Figure 12 - Scénario d'évolution de la température moyenne en Belgique pour la période 1951-2100. (IRM, 2020)
- Figure 13 - Variation du forçage radiatif en fonction du temps selon différents scénarios de changement climatique (GIEC, 2014)
- Figure 14 - Répartition des investissements en fonction des bâtiments et du type de rénovation (Prégardien et Marique, 2019)
- Figure 15 - Répartition des économies d'énergie réalisées par bâtiment en fonction du type d'énergie en MWh/an (Prégardien et Marique, 2019)
- Figure 16 - Photos avant (gauche) et après (droite) rénovation (J.-L. Deru & S. Defourny)
- Figure 17 - Méthodologie de travail
- Figure 18 - Schéma d'implantation (GoogleMaps,2020)
- Figure 19 - Schéma des compteurs d'électricité (Teen Consulting, 2015)
- Figure 20 - Schéma des compteurs de gaz (Teen Consulting, 2015)
- Figure 21 - Zonage de la toiture en fonction des parois
- Figure 22 - Représentation des différents types de sols sur une coupe longitudinale du bâtiment
- Figure 23 - Représentation des différents types de paroi sur une coupe transversale du bâtiment
- Figure 24 - Schéma de la distribution d'eau chaude dans le bâtiment
- Figure 25 - Rénovation de la toiture (Administration des ressources Immobilières, 2016)
- Figure 26 - Rénovation des parois verticales des niveaux +1 à +3 (Administration des ressources Immobilières, 2016)
- Figure 27 - Rénovation de la façade rideau (Administration des ressources Immobilières, 2016)

Figure 28 - Rénovation des châssis (Administration des ressources Immobilières, 2016)

Figure 29 - Schéma de l'alimentation en électricité au sein de l'Institut de Botanique

Figure 30 - Superposition des graphes de puissance électrique mesurée au SATEC pour les années 2015 à 2019

Figure 31 - Schéma du positionnement des compteurs de chaleur sur le circuit de chauffage

Figure 32 - Graphe de la consommation journalière de chaleur en fonction du temps

Figure 33 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur et de la température moyenne journalière en fonction du temps

Figure 34 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur du B22 et de la consommation de chaleur lue sur le compteur 3 en fonction du temps

Figure 35 - Signatures énergétiques identifiées sur base des données de consommation de chaleur des années 2018 et 2019 (Kevin Sartor)

Figure 36 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur du B22 pour les années 2015 à 2017

Figure 37 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur du B22 pour les années 2018 et 2019

Figure 38 - Graphe de la température moyenne mensuelle à 2 m au-dessus du sol pour 2015 à 2019

Figure 39 - Graphe du rayonnement incident pour 2015 à 2019

Figure 40 - Graphe de la température moyenne mensuelle pour 2015 à 2019

Figure 41 - Température moyenne annuelle pour la période 2020-2100

Figure 42 - Vue axonométrique du bâtiment dans DesignBuilder

Figure 43 - Vue en plan du bâtiment et de la végétation aux alentours dans DesignBuilder

Figure 44 - Profil horaire de l'occupation du bâtiment

Figure 45 - Profil horaire des équipements de bureau

Figure 46 - Profil horaire des auxiliaires

Figure 47 - Profil horaire du système de refroidissement

Figure 48 - Vue axonométrique des ouvertures dans Design Builder

Figure 49 - Profil horaire de l'éclairage

Figure 50 - Graphes de la consommation de chaleur mensuelle pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle non calibré)

Figure 51 - Consommation annuelle de chaleur selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle non calibré)

Figure 52 - Consommation annuelle de chaleur selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle calibré)

Figure 53 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle calibré)

Figure 54 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2016 selon trois types de calculs (modèle calibré)

Figure 55 - Profil horaire de la consommation d'électricité par l'éclairage pour l'année 2015

Figure 56 - Profil horaire de la consommation d'électricité par le système de refroidissement, de ventilation et de distribution d'eau chaude pour l'année 2015

Figure 57 - Profil horaire de la consommation d'électricité par les équipements et chambres climatiques pour l'année 2015

Figure 58 - Graphes de la consommation mensuelle d'électricité pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle calibré)

- Figure 59 - Consommation annuelle d'électricité selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle calibré)
- Figure 60 - Plan d'implantation du bâtiment B22 (Administration des Ressources Immobilières, 2016)
- Figure 61 - Graphes de la consommation de chaleur pour l'année 2019 selon trois types de mesures (modèle calibré)
- Figure 62 - Graphes de la consommation de chaleur pour l'année 2018 selon trois types de mesures (modèle calibré)
- Figure 63 - Consommation annuelle d'électricité selon deux types de calculs, pour l'année 2019
- Figure 64 - Consommation mensuelle d'électricité pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019
- Figure 65 - Distribution de la consommation d'électricité par poste pour les modèles avant (à gauche) et après (à droite) rénovation, pour l'année 2019
- Figure 66 - Consommation d'électricité annuelle par poste pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019
- Figure 67 - Consommation mensuelle de chaleur pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019
- Figure 68 - Déperditions au travers de l'enveloppe pour les modèles avant et après rénovation
- Figure 69 - Consommation d'énergie pour les modèles avant et après rénovation
- Figure 70 - Coût annuel de la consommation d'énergie pour les modèles avant et après rénovation
- Figure 71 - Emission de CO₂ en fonction du type de combustible pour les modèles avant et après rénovation
- Figure 72 - Profil horaire du taux de CO₂ pour quatre jours répartis sur l'année 2019
- Figure 73 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour la zone 16 pour l'année 2019
- Figure 74 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les zones 16, 18 et 19 pour l'année 2019, sur le modèle après rénovation
- Figure 75 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les zones 16, 18 et 19 pour l'année 2019, sur le modèle avant rénovation
- Figure 76 - Profil horaire de l'indicateur PMV pour la zone 16 pour l'année 2019, sur le modèle après rénovation
- Figure 77 - Répartition du pourcentage de temps pendant lequel le confort intérieur est optimal pour les trois zones étudiées
- Figure 78 - Demande de chaud et de froid annuelle pour les années allant de 2020 à 2100 par pas de 10
- Figure 79 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les années 2019 et 2100
- Figure 80 - Profil horaire de l'indicateur PMV pour les années 2019 et 2100
- Figure 81 - Nombre d'heures de surchauffe pour les années 2019 et 2100
- Figure 82- Effet du réchauffement climatique sur les événements climatiques extrêmes (Silmann, 2009)

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Composition des différentes parois de la toiture

Tableau 2 - Composition des différents types de murs

Tableau 3 - Données éclairage (Teen Consulting, 2015)

Tableau 4 - Caractéristiques des vitrages

Tableau 5 - Caractéristiques des groupes de traitement d'air

1. INTRODUCTION

« En mathématiques, une fonction exponentielle monte jusqu'au ciel. Sur terre, pour les écosystèmes et les organismes vivants, il y a un plafond bien avant. Soit elle se stabilise au niveau du plafond (et ne croît donc plus), soit elle le dépasse puis s'effondre » (Stevens et Servigne, p.2, 2013).

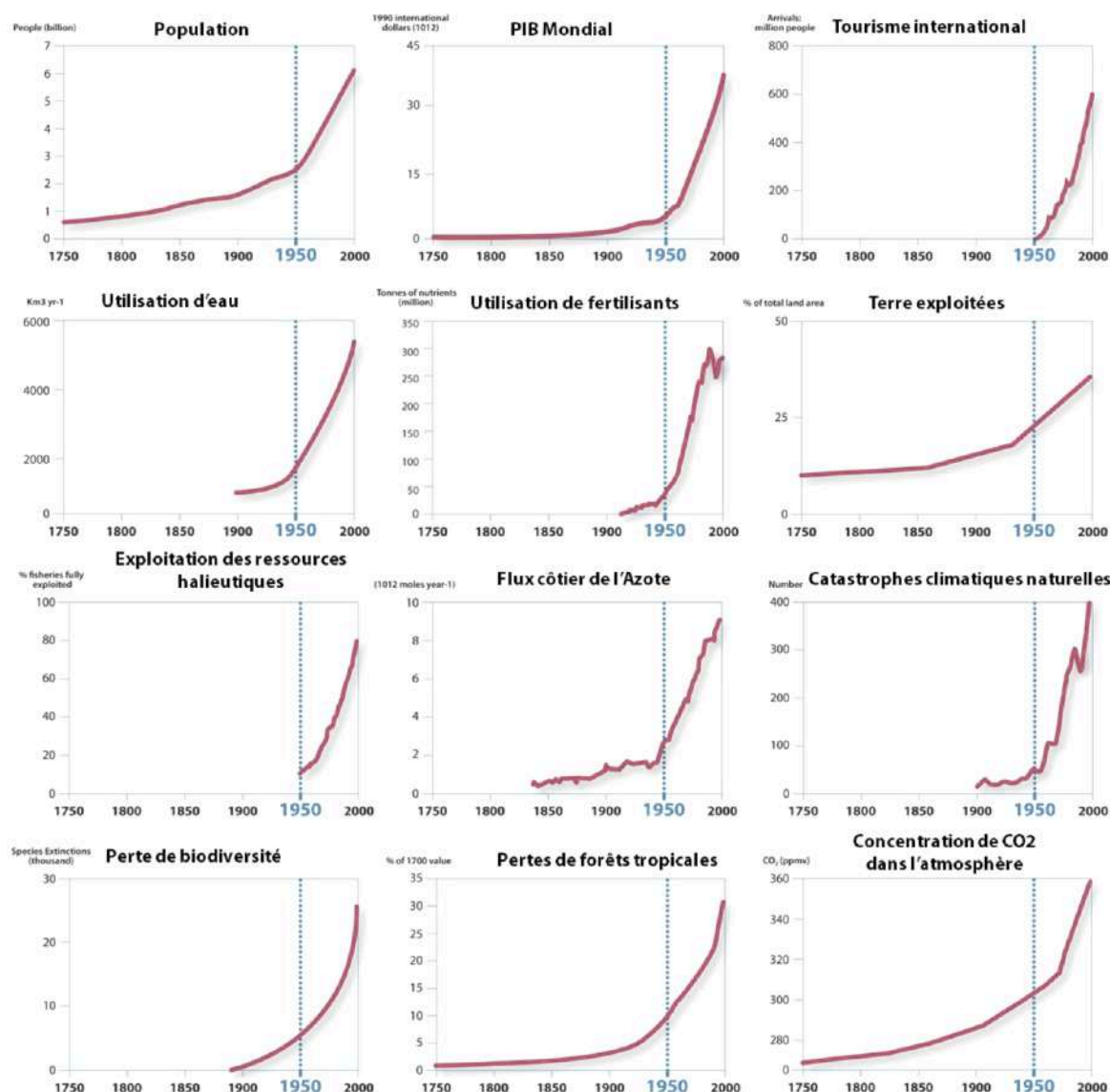


Figure 1 - Illustration des tendances socio-économiques et du système Terre (Stevens & Servigne 2013)

L'activité humaine de la révolution industrielle a basculé la stabilité de la Terre, une nouvelle ère géologique est née : l'Anthropocène qui se particularise par l'influence de l'homme dans le déséquilibre de l'environnement (Boutod et al., 2019).

En 2009, un groupe de 26 chercheurs ont défini la notion de limite planétaire dont le dépassement pourrait causer l'effondrement de la biosphère. Neuf limites, parmi lesquelles se trouve le changement climatique, enjeu majeur depuis les dernières décennies (Steffen et al., 2015).

Aujourd'hui, la limite planétaire est fixée à un taux de CO₂ dans l'atmosphère de 450 ppm. Dans certains pays, cette limite fixée à un taux plus bas est déjà dépassée. Son dépassement à l'échelle mondiale conduirait à des conséquences non réversibles et incontrôlables (Boutaud et al., 2019).

1.1 ENJEUX CLIMATIQUES

Depuis le début du second millénaire, selon la base de données EM-DAT (2020), 8 181 catastrophes naturelles ont été enregistrées ayant tué plus d'un million de personnes, touché plus de quatre milliards de victimes, et engendré un coût économique de plus de deux milliards d'euros. Les chiffres sont alarmants. Bien que de nature et de localisation différentes, ces catastrophes sont liées par leur origine : Le réchauffement climatique qui est la cause de la majorité (90%) des événements, selon le rapport du Centre de recherche de l'épidémiologie des catastrophes (CRED, 2016). Les conséquences de cette augmentation sont importantes, en plus du coût économique, elle constitue une menace non négligeable pour la santé des personnes (Boittiaux, 2017). On se rappellera de la vague de canicule qui a frappé une grande partie du continent européen en août 2003 tuant des dizaines de milliers de personnes (Schoune, 2004). Aujourd'hui, plus que jamais, le réchauffement climatique est au coeur des défis sociétaux.

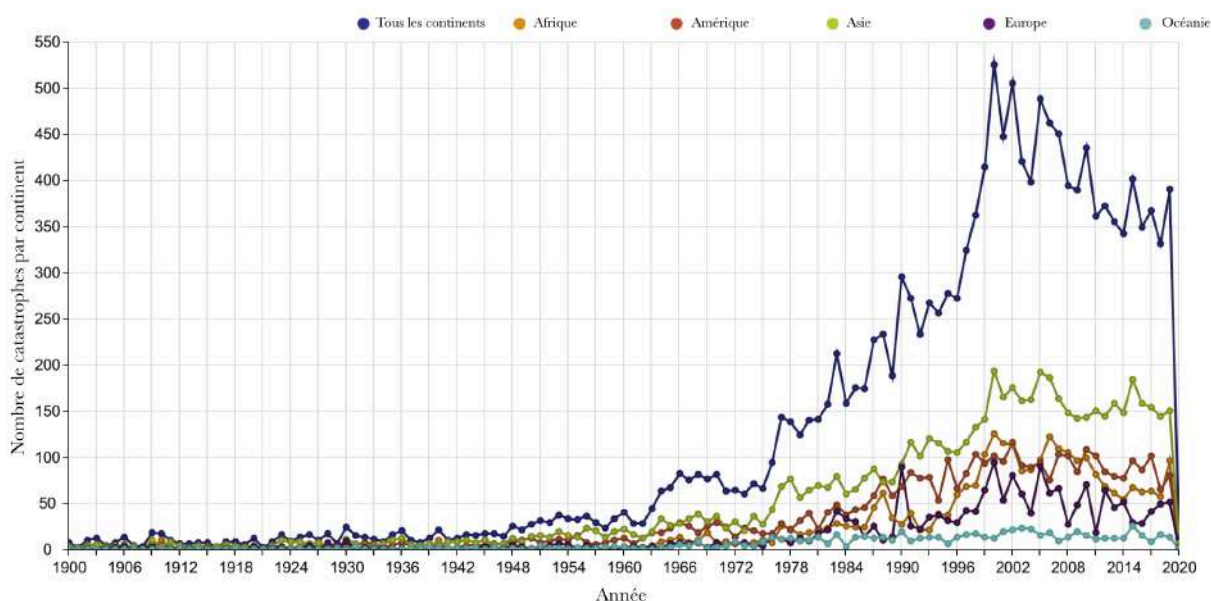


Figure 2 - Graphe de l'évolution du nombre de catastrophes par an sur les différents continents (EM-DAT, 2020)

1.1.1 LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE EN QUELQUES CHIFFRES

Dans l'édition 2020 du rapport réalisé par le Commissariat général au développement durable, quelques chiffres permettent de se rendre compte de la situation. L'écart entre la température moyenne actuelle et celle observée lors de la période préindustrielle, tel qu'illustré à la Figure 3, continue à croître dans le temps. Cette croissance a pour conséquence la fonte de calottes glaciaires dans les régions polaires, et donc l'élévation du niveau de la mer, à raison de 3,4 mm/an ces dernières années.

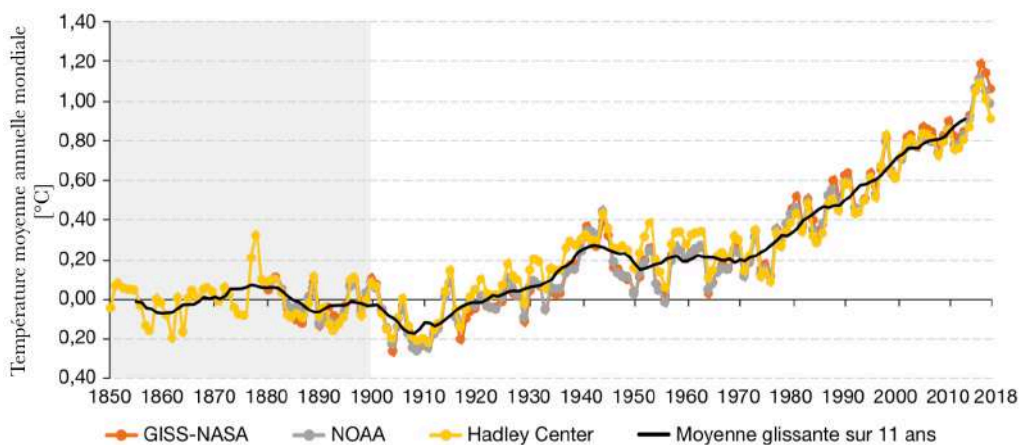


Figure 3 - Graphe de l'évolution de la température moyenne annuelle mondiale en fonction du temps (CGDD, 2020)

En Belgique, les tendances observées dans la station d'Uccle montrent un net réchauffement climatique, notamment depuis les années 1970. La Figure 4 illustre cette augmentation depuis la moitié du 19ème siècle. Le nombre de jours de canicule augmente considérablement chaque année.

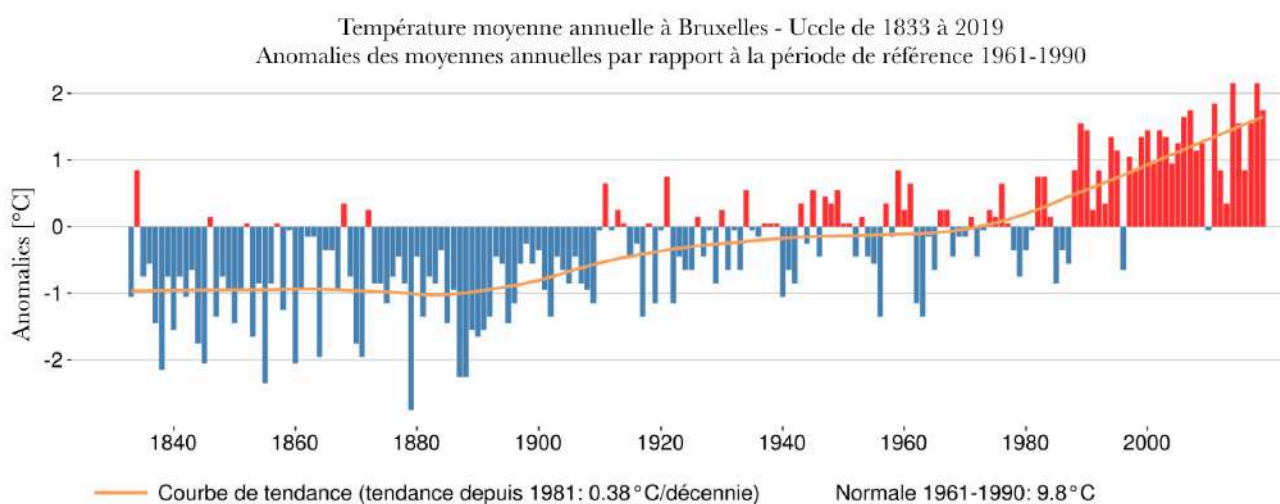


Figure 4 - Graphe de l'évolution de la différence de la température moyenne annuelle par rapport à la période de référence à Bruxelles en fonction du temps (IRM, 2020)

1.1.2 CAUSES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le 29 juillet 2019, l'humanité avait consommé les ressources annuelles, le jour du dépassement de la terre était atteint. Les ressources naturelles ne sont pas inépuisables, l'homme a mis du temps à prendre conscience de ce fait. Chaque année, ce jour arrive un peu plus tôt, l'empreinte écologique augmente, la Terre n'est plus capable de régénérer ce que l'humanité a consommé, elle n'est plus en mesure d'absorber la quantité de gaz à effet de serre émis par l'activité humaine. A partir de ce jour-là, l'homme vit grâce aux ressources futures (United Nations Climate Change, 2018).

La Belgique fait partie des pays qui ont une empreinte écologique relativement élevée, elle tourne autour des 7,1 hectares globaux par habitant par an, l'empreinte carbone étant la composante la plus élevée (autour de 3 hag). La capacité biologique disponible par personne à l'échelle mondiale étant le quart de la demande de celle en Belgique (Wackernagel et al., s.d.).

A l'échelle mondiale, l'empreinte carbone représente 60% de l'empreinte écologique (United Nations Climate Change, 2018). Cette émission de gaz à effet de serre provenant des activités humaines constitue l'une des causes du réchauffement climatique.

Dans leur livre « *Planetary Boundaries : Guiding human development on a changing planet* », Steffen et al. (2015) abordent trois des neuf limites planétaires parmi lesquelles se retrouve le changement climatique. Ils introduisent quelques graphes représentant l'évolution d'indicateurs parmi lesquels on retrouve les gaz à effet de serre, repris à la Figure 5. L'allure des courbes montre une croissance exponentielle des émissions.

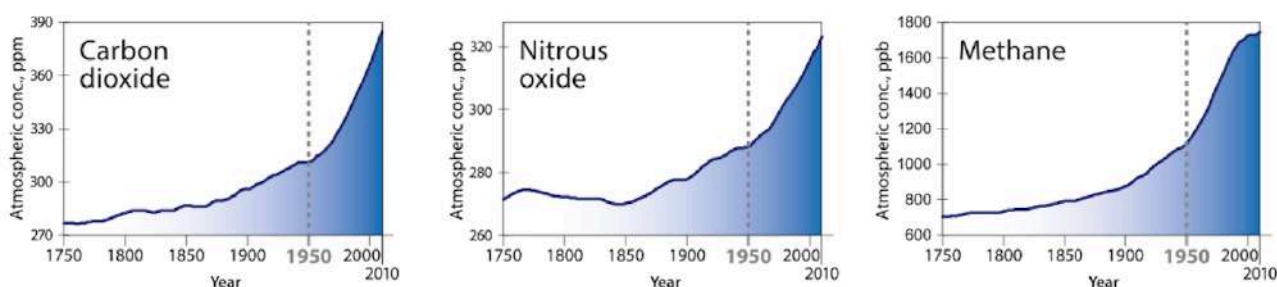


Figure 5 - Graphiques de la croissance de gaz à effet de serre (Steffen et al., 2015)

Divers secteurs sont la source de ces émissions; on retrouve, notamment, l'industrie classée premier producteur de gaz à effet de serre dans le monde et, en Belgique, le transport, l'agriculture ainsi que le secteur du bâtiment qui représente une part non négligeable des émissions de gaz à effet de serre tant au niveau mondial que national comme illustré dans la Figure 6 (Marbaix et al., 2018).

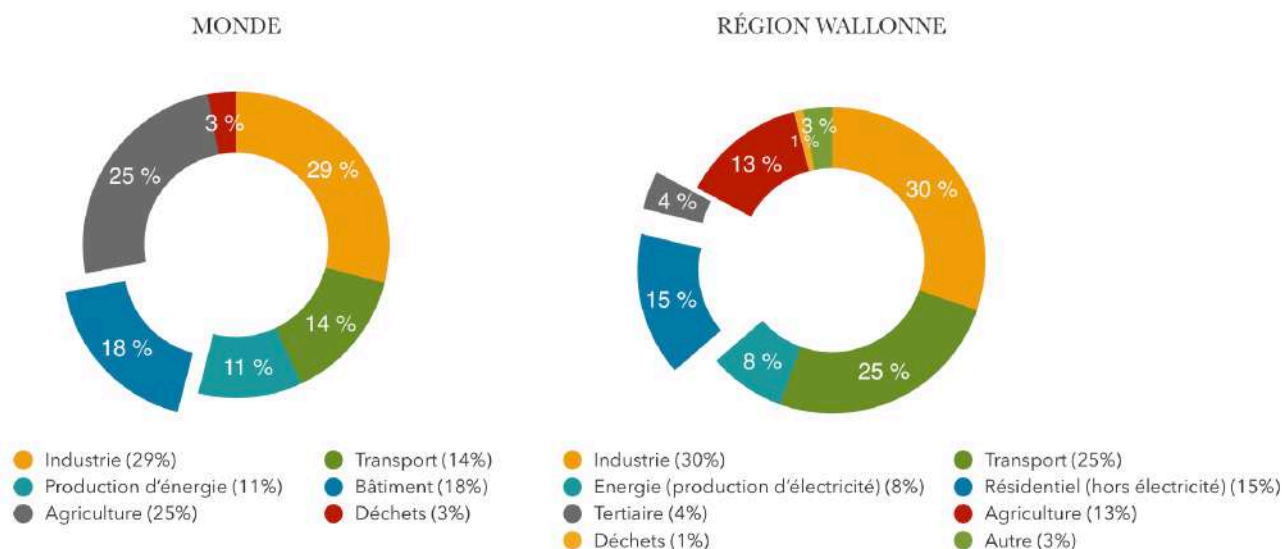


Figure 6 - Répartition sectorielle des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial (pour l'année 2014) et de la Région wallonne (pour l'année 2016) (climat.be, s.d.)

Depuis les années 1990, les émissions de ces différents secteurs ont évolué, certains ont augmenté, d'autres ont diminué leurs émissions de gaz à effet de serre. Comme le montre le graphe de la Figure 7, lors des dernières décennies, le secteur tertiaire a augmenté ses émissions en Belgique. Ces émissions sont dues à la consommation de combustible qui a connu une hausse de 46% les 30 dernières années probablement due au développement économique et à l'augmentation de 30% du nombre de travailleurs. Une fluctuation est observée en fonction des conditions du climat (climat.be, s.d.).

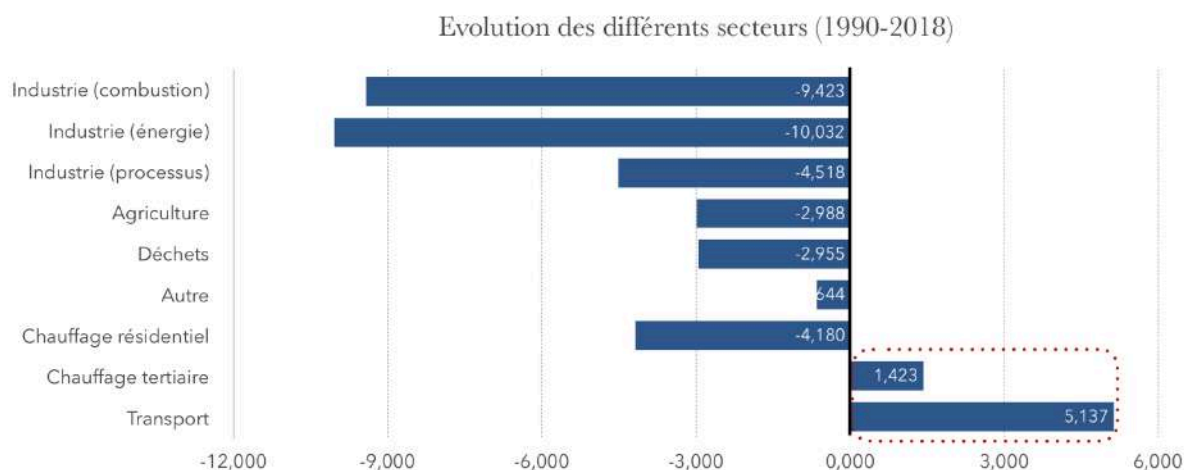


Figure 7 - Evolution des émissions de gaz à effet de serre des différents secteurs de 1990 à 2018 (climat.be, s.d.)

1.1.3 CADRE MONDIAL

C'est dans ce contexte que, en 1998, le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), regroupant des scientifiques partout dans le monde, a été créé par l'ONU. Tous les 5 ans, l'organisme publie un rapport faisant le bilan de littératures scientifiques sur la thématique du climat (Dumazet, 2014).

En 1992, lors du sommet de Terre à Rio, a été adopté la Convention sur les changements climatiques dans une optique de lutte contre les émissions anthropiques de gaz à effet de serre engendrant le réchauffement climatique. La Belgique fait partie des premiers pays ayant signé ce texte dans lequel on trouve les objectifs, les obligations des Etats, ... (Nations Unies, 1992). Seule, cette convention, n'est pas suffisante pour atteindre les objectifs. C'est ainsi qu'en 1997, le Protocole de Kyoto vient prolonger la convention pour la période 2008-2012. On parle pour la première fois, des pays industrialisés, un système de quotas de droits d'émissions est mis en place. Le Protocole a été actualisé en 2012 lors du sommet de Doha pour la période 2013-2020 (Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des énergies, 2015). Lors de la 21ème conférence des Parties organisée en 2015, l'accord de Paris a été signé. L'objectif est de réduire, d'ici 2050, les émissions afin de limiter le réchauffement climatique en dessous de 2°C (par rapport au niveau pré-industriel) (Belga, 2017), ce qui implique pour les membres de l'Union européenne, une diminution des émissions de 85 à 90% (climat.be, s.d.).

La dernière Conférence des parties sur les changements climatiques (COP25) en date a eu lieu à Madrid, en 2019. Il en est sorti la déclaration politique « *Chile Madrid Time for Action* » des informations supplémentaires concernant les contributions déterminées au niveau national des Parties (climat.be, s.d.).

Ces objectifs fixés à l'échelle mondiale, permettront d'éviter les conséquences les plus lourdes du réchauffement climatique.

1.1.4 CADRE EUROPÉEN – POLITIQUE CLIMATIQUE

L'Union européenne a alors établi les moyens permettant d'atteindre les objectifs fixés lors de l'accord de Paris. En 2014, le Conseil européen a fixé les objectifs à atteindre en matière d'émission de gaz à effet de serre. Pour les secteurs non ETS comprenant le secteur du bâtiment, une réduction de 30% des émissions est fixée d'ici 2030 par rapport à la valeur enregistrée en 2005 (europa.eu, 2017). Le cadre « *énergie-climat 2030* » a été publié, faisant le point sur les objectifs qui ont, par la suite, été convertis en objectifs contraignants pour les membres de l'UE. Un règlement sur la répartition des efforts a été mis en place permettant ainsi de transformer les ambitions émises en actions (Conseil de l'UE, 2018). L'objectif sera alors réparti entre les différents Etats membres, par la mise en place d'un système de quotas. Il est du devoir de chaque membre de fixer à l'échelle nationale ses propres objectifs pour ce qui touche à la production d'énergie renouvelable, ainsi qu'à l'efficacité énergétique.

« Pour la Belgique, un objectif pour 2030, très ambitieux, de -35% par rapport à 2005 est proposé. Pour atteindre cet objectif non ETS, il y aura lieu de travailler spécifiquement sur les secteurs du transport, des bâtiments (résidentiels et tertiaires), ainsi que sur le développement de la chaleur renouvelable comme source d'énergie. Le secteur des bâtiments est donc un levier essentiel dans ce cadre. » (Gouvernement wallon, 2017, p.11).

Des mesures visant à l'augmentation des performances énergétiques des bâtiments ont été publiées en 2016 par la Commission européenne, sous la forme d'un paquet qui contient à la fois des règlements et des propositions de directives sous le nom de « *Une énergie propre pour tous les Européens - libérer le potentiel de croissance de l'Europe* ». L'objectif, résumé à la Figure 8, est d'améliorer l'efficacité énergétique de 20% d'ici 2020, et de 27% d'ici 2030 (Commission européenne, 2016).



Figure 8 - Package 2020 et 2030 de la Commission européenne (Gouvernement wallon, 2017)

1.1.5 CADRE WALLON

Au vu des engagements qu'a pris la Belgique à l'échelle européenne, il est dans le devoir du Gouvernement wallon de déterminer les objectifs auxquels la Région doit parvenir, particulièrement pour ce qui est de la consommation énergétique dans les secteurs du transport et du bâtiment.

On peut lire dans la Déclaration de Politique Régionale 2019-2024 : « *Une réponse crédible et durable doit être apportée face à l'enjeu climatique et environnemental. [...] L'ensemble des secteurs doit contribuer solidairement et équitablement aux objectifs climatiques de la Wallonie.* » (Parlement Wallon, 2019, p.31-32).

Afin de remplir l'objectif national : « *réduire de 55% les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 et de 80 à 95% d'ici 2050 par rapport au niveau de 1990* » (Parlement Wallon, 2019, p.31-32), le Gouvernement wallon devra fixer les objectifs que chaque secteur devra atteindre en terme d'émission.

Une stratégie nommée « *Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment* » a donc été mise en place par le Gouvernement. Elle complète le décret relatif à la performance énergétique des bâtiments, et de nombreux autres plans et décrets fixant les objectifs et les moyens pour les atteindre. Parmi ceux-ci, on retrouve l'Alliance Emploi-Environnement et le Plan Air Climat Energie 2016 - 2022.

« *Le principe de l'Alliance Emploi-Environnement est [...] de réduire notre facture énergétique et notre impact sur le climat en soutenant nos entreprises, en créant des emplois, en améliorant le confort des habitants.* » (Gouvernement bruxellois, 2019, p,5). La rénovation énergétique de bâtiments tertiaires fait partie des actions entreprises pour atteindre les objectifs.

Le Plan Air Climat Energie, quant à lui, englobe les actions à entreprendre sur le tertiaire et fait le point sur les performances énergétiques (Agence wallonne de l'air & du climat, 2016).

Ce secteur consomme 11% de l'énergie de la Région wallonne ce qui équivaut à 5% d'émissions. C'est le secteur qui a connu la plus grande croissance en terme de consommation depuis les années 1990, l'augmentation d'équipements bureautiques a également causé une hausse rapide de la consommation d'électricité (Service public de Wallonie, 2019). La Figure 9 fait le lien entre l'augmentation du nombre d'emplois et la consommation d'énergie.

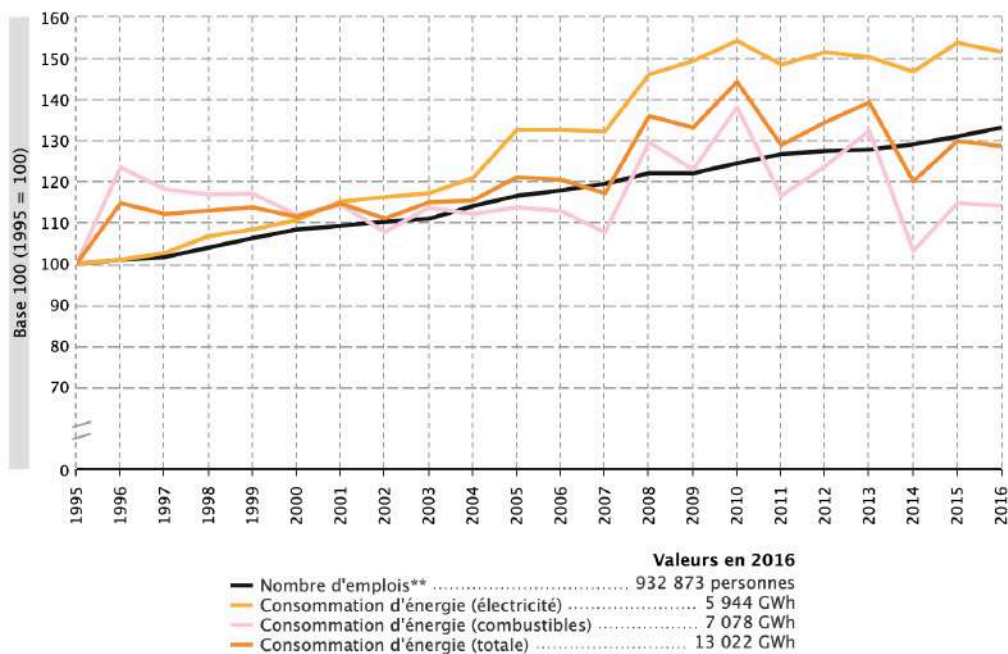


Figure 9 - Consommation énergétique du secteur tertiaire en Wallonie (SPW DGO4, s.d.)

En Belgique, le secteur du tertiaire est celui qui a enregistré la plus grande croissance en termes de consommation, c'est aussi le secteur où d'importantes économies d'énergie sont possibles (SPW, s.d.).

Selon Meyer et Maréchal (2016), il est impératif de rénover le bâti existant, repenser uniquement les nouveaux bâtiments ne suffira pas à atteindre les objectifs.

2. ETAT D'ART

2.1 RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

La recherche d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment est au coeur des enjeux de la société actuelle. La majorité des bâtiments (73%) ont été construits avant la mise en place des premières normes concernant les performances énergétiques en 1981 et ne respectent donc pas les exigences fixées par la PEB. Aujourd'hui, des exigences sont imposées pour les projets de rénovation, tant au niveau de l'enveloppe qu'au niveau des installations. C'est dans la rénovation énergétique de ce patrimoine que réside un potentiel de gain économique d'énergie.

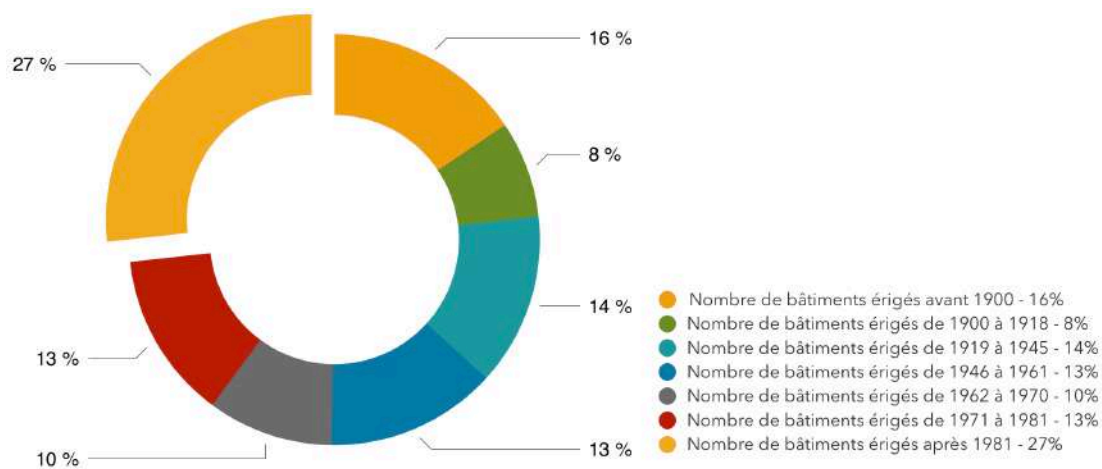


Figure 10 - Répartition des bâtiments en fonction de leur date de construction en Belgique (Statbel, 2019)

Face à tout bâtiment ne répondant pas aux besoins et exigences actuels se pose la question « *Rénover ou démolir ?* ». La question a été étudiée par de nombreux scientifiques, une rénovation énergétique serait, d'après Anne Power (2008), plus rentable qu'une démolition, suivie d'une reconstruction lorsqu'on parle sur le plan environnemental. Le CSTC s'est penché sur cette thématique et propose une démarche bien précise qui se décline en trois étapes (Vrijders et Loncour, 2016). La première est celle du diagnostic, une aide à la prise de décision. Elle permet de quantifier les performances énergétiques au travers d'un audit, et ainsi de cibler les éléments consommateurs d'énergie, l'état technique ainsi que les limites comme l'appartenance au patrimoine par exemple. Dans la seconde étape, une stratégie de rénovation est conçue en fonction des normes existantes, des travaux à entreprendre pour les atteindre et du phasage de la rénovation. Pour finir, cette stratégie est mise en oeuvre.

Les motivations d'une rénovation énergétique sont à la fois de l'ordre du social, écologique et économique (Ruellan, 2016). L'objectif principal de la rénovation est la diminution de consommation énergétique du bâtiment et les économies que cela va engendrer, elle permet également une augmentation de la valeur du bâtiment, la création de l'emploi,... (Mlecnik, Hilderson, et al., 2011). Trois approches peuvent être

considérées: une rénovation permettant d'atteindre simplement les exigences, une rénovation permettant d'aboutir à l'optimisation des coûts et de diminuer la facture énergétique ou une rénovation poussée permettant d'accéder à un niveau énergétique relativement élevé. Le graphe de la Figure 11 illustre ces différents types de rénovation.

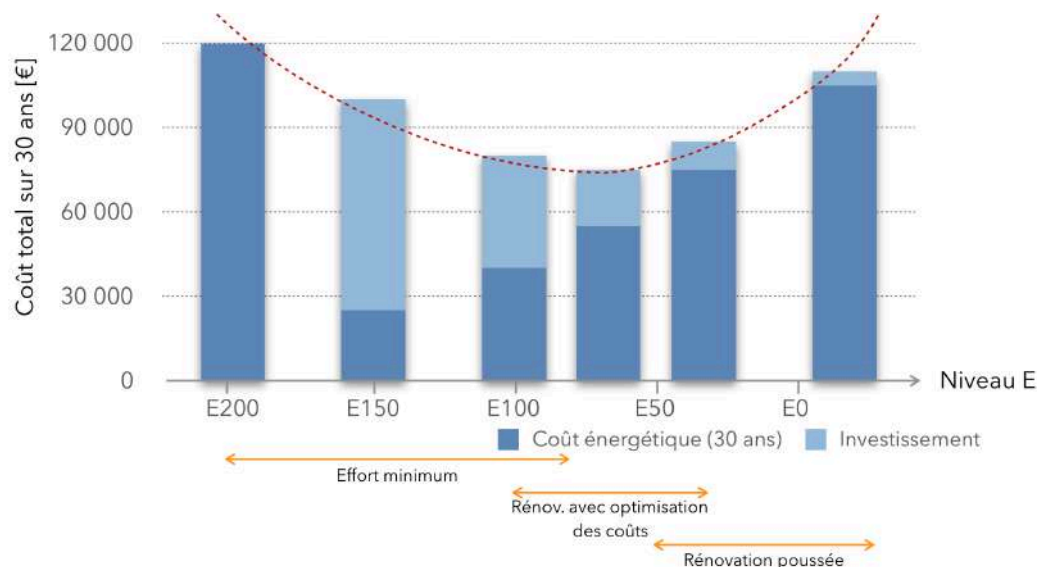


Figure 11 - Représentation simplifiée d'une courbe d'optimisation des coûts pour la rénovation d'une habitation (cas d'une maison de maître étudié par l'Agence flamande de l'énergie en 2013) (Vrijders et Loncour, 2016)

Le centre de recherche considère qu'il existe des conditions limites, par exemple l'appartenance du bâtiment au patrimoine, qui doivent être étudiées en profondeur. Lors d'une rénovation énergétique, il est important de garder à l'esprit les qualités patrimoniales et architecturales que possède le bâtiment.

Cependant, au vu du réchauffement climatique auquel fait face la planète, de nombreuses questions se posent. Les exigences visées aujourd'hui lors des rénovations seront-elles respectées dans quelques années ? Les performances atteintes respecteront-elles les règlements futurs ? Les systèmes mis en place vont-ils s'avérer suffisants pour garder un confort au sein du bâtiment ?

2.2 MESURE DE L'IMPACT CLIMATIQUE SUR LE BÂTIMENT

Dans le secteur du bâtiment, lorsqu'on parle de changement climatique, on fait référence au réchauffement climatique. Les étés sont de plus en plus chauds, les hivers plus doux; les vagues de chaleur sont en hausse d'année en année. Ce phénomène de réchauffement climatique en Belgique, illustré à la Figure 3, est flagrant lorsque l'on observe la variation des températures moyennes annuelles. Au cours des trois dernières décennies, la croissance est de plus en plus rapide. Comparée à l'augmentation de la température moyenne mondiale et européenne entre 1850 et 2013, la Belgique se situe en première position avec une augmentation de 2°C. En période hivernale, la température a augmenté de 2°C et de 3°C et, en période estivale, on

constate une augmentation non négligeable des vagues de chaleur et une diminution des vagues de froid depuis la fin du 20ème siècle (Brouwers et al., 2015).

Ce phénomène climatique a des impacts sur les bâtiments dont la fonction même est de protéger les personnes de ces phénomènes naturels (Salagnac, 2016). Il se traduirait par une diminution de la demande de chaud et une augmentation de la demande de froid. Le choix des systèmes, les performances visées et tout simplement la robustesse de l'architecture seraient sans doute remis en cause.

Bien que les objectifs soient clairs, que les efforts à l'échelle mondiale s'avèrent efficaces ou non, le phénomène est, et restera, présent. Le seul élément sur lequel l'humanité peut agir est la vitesse de celui-ci, qui permettrait de diminuer les conséquences. Qu'en sera-t-il si le scénario mis en place n'est pas respecté ? Selon l'agence européenne (AEE), « *Tout scénario d'augmentation des émissions entraînerait un changement climatique beaucoup plus important [...] les actions entreprises par les différentes instances pourraient atténuer quelque peu l'impact du changement climatique. Cependant, il y aura malgré tout des conséquences relativement importantes, quand bien même les efforts se révéleraient efficaces.* » (Ryckmans, 2020).

Dans son dernier rapport, le GIEC présente, pour la Belgique, trois scénarios illustrés à la Figure 12 : un optimiste, un intermédiaire et un pessimiste. Le pire scénario prévoit une augmentation de température autour de 5°C. Dans les 3 cas, c'est en hiver que l'augmentation de température sera la plus marquée (IRM, 2020).

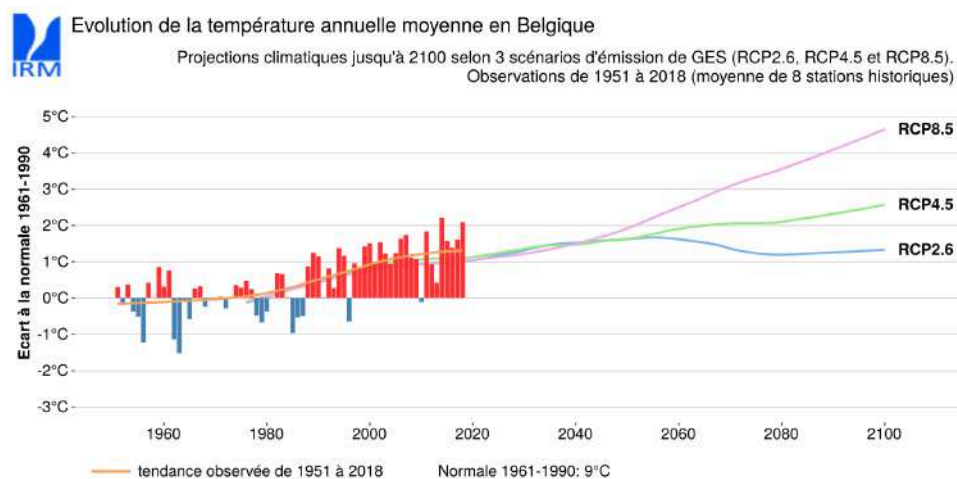


Figure 12 - Scénario d'évolution de la température moyenne en Belgique pour la période 1951-2100. (IRM, 2020)

« *La manière dont nous habitons nos territoires en dit long sur notre vision du monde. [...] Du haut de décennies de croissance économique et démographique, au sommet d'un système énergétique époustouflant, notre société industrielle semble bien s'être rendue maître et possessive de la nature. Notre puissance est inouïe et pourtant nous n'avons jamais été aussi fragiles. [...] il peut être utile de se projeter dans un futur qui ne se situe pas dans la linéarité du présent, comme nous avons si tendance à le faire, mais dans un futur qui tient compte des risques d'effondrement systématique que nous courons actuellement.* » (Lacroix, 2018, p.4).

C'est là que devient intéressant la mesure de l'impact du réchauffement climatique sur le secteur du bâtiment. Car comme le relève le CRED dans *The human cost of weather related disasters* (2016, p.3) « *Plus nous comprenons les causes et les conséquences de la génération et de l'accumulation des risques, mieux nous serons en mesure de nous adapter, d'atténuer et de prévenir à l'avenir, quel que soit cet avenir qui nous attend.* »

2.3 REVUE LITTÉRAIRE

Au vu des problématiques actuelles liées au changement climatique, la rénovation de bâtiments anciens constitue un enjeu essentiel dans la lutte contre le réchauffement. Arrivé à la fin de sa durée de vie, la rénovation du bâtiment est une solution efficace face à la démolition, elle permet au bâti ancien de répondre aux normes actuelles, prolongeant ainsi sa durée de vie et réduisant son impact négatif sur l'environnement. Les bâtiments historiques nécessitent une grande quantité d'énergie pour créer des conditions de confort acceptables. Cette utilisation, bien que local, de bâtiments inefficaces en termes d'énergie pourrait avoir des effets mondiaux. Ces problèmes deviennent alors globaux, notamment lorsqu'ils ne sont pas empêchés. Par ailleurs, il est impératif de réduire cette consommation d'énergie cause d'émission de CO₂. Les bâtiments historiques, au même titre que les autres, doivent, selon Cassar (2009), être adaptés au changement climatique. De nombreuses études ont démontré que la rénovation des bâtiments existants est plus efficace que la construction de nouveaux bâtiments, selon De Bouw et al. (2016), il est possible de les améliorer à moindre coût. Des analyses de cycle de vie ont permis de se rendre compte que l'impact environnemental est moindre (Meijer et al, 2009).

Concilier l'adaptation aux exigences actuelles en termes de performance énergétique des bâtiments anciens et la protection du patrimoine est une problématique majeure. Devenu un nouveau défi, ce sujet a suscité l'attention de nombreux chercheurs. Les premiers intérêts portés à la rénovation énergétique ont émergé à la fin du XX^{ème} siècle, suite à la mise en place des exigences de performance énergétique du bâtiment. « *Dans les années 1970, la réhabilitation énergétique des bâtiments consistait en des mesures simples telles que, l'extinction de l'éclairage inutile, l'abaissement des consignes de chauffage, l'augmentation de la consigne de rafraîchissement...* » (Krtari et Marchio, 2016, p.8). Aujourd'hui, des outils de simulation permettent de réaliser un audit énergétique du bâtiment à rénover, afin de cibler les mesures à mettre en oeuvre pour diminuer la consommation énergétique et quantifier la rentabilité de la rénovation.

Ces dernières années, la littérature scientifique s'est penchée sur la rénovation énergétique de bâtiments patrimoniaux de la période moderniste (1920-1980) qui représentent 60% du patrimoine bâti belge, à l'heure où leur rénovation devient de plus en plus urgente en raison de leur âge (Prégardien et Marique, 2019). En raison d'un manque d'entretien et, surtout, du coût important qu'engendre le chauffage de ces bâtiments ayant été réalisés avant l'apparition des exigences en termes de performance énergétique, la plupart sont, aujourd'hui, dans un état critique et nécessitent une rénovation plus ou moins importante. Deux choix se présentent, rénover ou démolir. Selon Morelli et al. (2014), la rénovation engendre des coûts importants, ce qui penche les investisseurs vers la démolition, suivie d'une reconstruction d'un bâtiment répondant aux

exigences actuelles grâce à des technologies développées. Là où une condition limite se pose, c'est lorsqu'ils se trouvent face à des bâtiments à valeurs patrimoniales. Est-il possible de concilier une rénovation énergétique et la préservation des valeurs patrimoniales et architecturales ? Le risque de perdre ces valeurs est présent, ce qui explique que peu nombreux sont les bâtiments modernistes qui ont subi une rénovation énergétique. Certains auteurs ont, tout de même, tenté de mettre en oeuvre des guides de rénovation énergétique permettant de concilier ces deux aspects à travers des écrits.

La rénovation énergétique de biens protégés ou de valeurs culturelles, au même niveau que toute intervention, doit être considérée en tant qu'outil de protection du bâtiment, et non un « *processus de mise à niveau en contradiction avec les exigences de conservation* » (ICOMOS, 1964). Tout choix de conception doit faire appel à des experts (De Santoli, 2015). Deux enjeux majeurs sont alors confrontés : l'intervention sur un bâtiment historique possédant des contraintes à la fois historiques, culturelles, sociales et architecturales, et la rénovation de l'efficacité énergétique pouvant affecter l'intégrité du bâtiment.

A l'échelle de l'Europe, la norme européenne EN 16883 relative à la conservation de l'héritage culturel met en avant des conduites permettant d'atteindre les objectifs d'amélioration de performances énergétiques de bâtiments anciens en proposant diverses mesures de diminution de gaz à effet de serre.

En Belgique, le projet INTERREG DEMI MORE, réalisé par les néerlandais et les flamands, étudie les différentes mesures permettant de rendre les monuments économes en énergie, tout en respectant leurs valeurs. Il en est sorti de cette étude un code de bonnes pratiques concernant la restauration : « *DEMI MORE : une approche intégrée du processus de conservation* ». Le texte concerne les trois régions de la Belgique, il se fonde sur des normes à la fois de durabilité et de patrimoine. Il fait le point sur les objectifs de la restauration, la législation, l'analyse nécessaire, la conception, ... (Descamp et al., 2018). En Wallonie, différents textes ont vu le jour. Le Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie met en avant différentes techniques de rénovation durable. Réalisé par l'équipe de recherche Architecture et Climat de l'UCL, il permet de guider tout concepteur dans sa démarche en matière de rénovation énergétique de logements. En 2016, avait lieu, à Bruxelles, la seconde conférence sur l'efficacité énergétique et le confort des bâtiments historiques. Des experts internationaux étaient présents, l'objectif était de partager les expériences et derniers développements en matière de rénovation énergétique des bâtiments historiques, et la manière dont il est possible de concilier cela avec la préservation de leurs intégrité et valeurs (De Bouw et al., 2016).

En France, Effinergie a lancé, en 2019, un nouveau label expérimental nommé « *Effinergie Patrimoine* » pour la rénovation énergétique de bâtiments présentant un caractère patrimonial ou protégés, comme « *monuments historiques* » (G., 2019) et ce, dans l'intention d'améliorer la qualité de vie des occupants et de valoriser et protéger le patrimoine. A la suite des travaux réalisés auparavant, le constat qui en est sorti est que « *la valorisation patrimoniale et la rénovation énergétique ne sont pas des démarches contradictoires, mais elles nécessitent une approche concertée et collaborative.* » (Observatoire BBC, 2019, p.1).

Le sujet a également suscité l'intérêt des étudiants de l'Université de Liège. Dans son mémoire sur la « *renovation énergétique des bâtiments à intérêt patrimonial* », Anne-Claire Olivier (2014) a étudié les différentes techniques de rénovation au travers de 6 études de cas parmi lesquels on retrouve à la fois du résidentiel et du tertiaire. L'idée était de faire un bilan des solutions existantes et envisageables en fonction des spécificités patrimoniales des bâtiments dans le but de proposer une méthodologie permettant à tout propriétaire, ou chargé de projet, de trouver une solution. L'outil se présente sous la forme d'un arbre décisionnel, permettant d'aboutir à une proposition finale de solution de rénovation énergétique, en fonction du diagnostic, des critères patrimoniaux et des critères réglementaires.

Mathilde Winkin (2019), elle, s'est penchée sur l'étude d'un seul cas celui de l'ancien presbytère de Rachamps, et a traité le cas de l'isolation thermique comme mode de rénovation énergétique d'un bâtiment classé au patrimoine. Cette recherche a permis de faire apparaître les différentes solutions permettant de concilier les critères énergétiques imposées des bâtiments, et les contraintes de classement.

Dans les bâtiments modernes, c'est l'image qu'ils renvoient, résultat de la manière dont ils ont été construits, qui fait d'eux des édifices si spéciaux et non pas leur aspect. La qualité du bâtiment est le reflet du processus de construction et de la réflexion qui réside derrière. Comme le soulignent Prégardien et Marique (2019, p. 3) : « *Pour intervenir de manière adéquate sur de tels bâtiments, il est impératif d'avoir une connaissance extrêmement précise, architecturale mais aussi technique [...] car c'est de la relation entre la matière, les réalités structurelles, constructives et techniques qu'émerge la qualité du bâtiment.* »

L'audit énergétique est souvent mis au coeur des mesures permettant d'améliorer les performances énergétiques d'un bâtiment. En Italie, AiCARR a établi une procédure d'amélioration de l'efficacité énergétique de bâtiments appartenant au patrimoine historique. Elle comprend une première phase de calcul d'indice de performance énergétique suivie d'un audit permettant d'évaluer l'état initial du bâtiment, et les améliorations futures. C'est un processus itératif jusqu'à atteindre un résultat satisfaisant, un indice de performance bien en dessous de celui imposé par la réglementation (De Santoli, 2015).

L'audit énergétique est devenu une étape fondamentale. On le retrouve dans la norme européenne EN 16247-1 relative à l'audit énergétique publiée par le Comité européen de normalisation. La directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique (Parlement européen et Conseil, 2012) définit l'audit énergétique, dans l'article 2, comme « *une procédure systématique visant à acquérir une connaissance adéquate des caractéristiques de consommation énergétique d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments, d'une activité ou d'une installation industrielle ou commerciale ou de services privés ou publics, de déterminer et de quantifier les économies d'énergie qui peuvent être réalisées d'une façon rentable, et de rendre compte des résultats* » (Conseil européen, 2012, p.11). La directive fait le point sur les responsabilités des Etats membres de l'Union européenne.

En Région wallonne, dans l'article 3 de « *l'Arrêté du Gouvernement wallon instaurant une obligation d'audit énergétique en exécution du décret du 9 décembre 1993 relatif à la promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie, des économies d'énergie et*

des énergies renouvelables », on peut lire: « au minimum tous les quatre ans, les grandes entreprises: réalisent un audit énergétique proportionné, représentatif, rentable... » (Région wallonne, 2016).

Différentes méthodes d'audit ont été développées partout dans le monde avec, pour objectif, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, dans un souci de faire tendre leurs performances énergétiques vers les valeurs du bâtiment neuf (Krarti et Marchio, 2016).

En France, l'ADEME a rédigé « *Le guide à la rédaction d'un cahier des charges* », un guide d'aide à la décision dans lequel il propose 4 étapes : « *Etat des lieux, bilan énergétique et préconisations, programmes d'améliorations, analyse financière* » (ADEME, 2015).

En 2018, le Service Public de Wallonie a publié: « *Mise au point d'une méthode d'audit énergétique pour le tertiaire et l'industrie : Méthodologie unifiée* », une procédure d'audit unifiée pour les secteurs tertiaires et industriels. L'audit prend en compte les consommations énergétiques du bâtiment mais aussi celles liées « *aux activités opérationnelles et au transport* ». « *La méthode proposée permet de suivre la performance énergétique d'une entreprise, c'est-à-dire de l'amélioration des consommations d'énergie par rapport à soi-même* » (Service Public de Wallonie, 2018, p.4). La démarche proposée est composée de 4 phases distinctes : la collecte des informations concernant le bâtiment et l'analyse des systèmes énergétiques constituent les premières étapes qui vont permettre de cibler les mesures d'améliorations. La dernière phase consiste à réaliser un rapport reprenant les premiers points et les objectifs d'amélioration.

En dehors de l'Europe, aux Etats-Unis, l'ASHRAE propose, dans le Standard 211, 3 niveaux d'audit: l'audit simple dans le cas de bâtiments tertiaires « *dont les mesures d'économie d'énergie sont connues à l'avance et peu coûteuses* », l'audit standard pour les bâtiments dont « *les mesures d'efficacité énergétique ne sont pas directes ou évidentes et qui nécessitent généralement des investissements plus importants* » et l'audit détaillé pour les bâtiments nécessitant une étude beaucoup plus détaillée, comme une simulation (ASHRAE, 2011).

2.3.1 RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE D'ÉTABLISSEMENTS SCOLAIRES

Une grande partie des bâtiments anciens est dédiée aux activités d'apprentissage. Ces bâtiments se caractérisent par une grande diversité d'activités et de profils d'utilisateurs. L'amélioration de l'efficacité énergétique de ces bâtiments est, non seulement pertinente pour la remise à neuf du bâti à caractère patrimonial, mais aussi et surtout pour les utilisateurs. Occupé par des étudiants, ce type d'établissement requiert une grande quantité d'énergie permettant d'assurer un niveau de confort thermique et une qualité de l'air intérieur élevée, facteur déterminant leur productivité et santé. Dans la littérature, les travaux de rénovation de bâtiments éducatifs viennent à conclure qu'il est possible de réaliser des grandes économies d'énergie. De plus, dans ces établissements, les coûts énergétiques représentent une grande part des dépenses liées à leur fonctionnement. Le chauffage représente près de 50% de la consommation d'énergie, la ventilation, le refroidissement et la production d'eau chaude sanitaire représentent 1/10 de la consommation (Dias Pereira et al., 2014).

Le projet FP7 3 ENCLUT (Troï, 2016) démontre qu'il est possible de diminuer la demande d'énergie tout en préservant les valeurs patrimoniales des bâtiments historiques au travers de 3 études de cas, sur base desquels les avantages que permet ce type d'intervention, à savoir, le confort thermique, visuel et l'économie, sont illustrés. Le projet soutient le fait que « *la véritable protection du patrimoine culturel, peut être obtenue par son intégration dans la vie quotidienne* » (Troï, 2016, P.10). Parmi les 3 projets, l'école Höttinger d'Innsbruck en Autriche a été étudiée pour la partie amélioration de la qualité de l'air et du confort thermique. L'école présente des problèmes de surchauffe en été et une demande de chaud élevée en hiver, due à la grande surface des fenêtres. L'intervention consistait en l'ajout d'une ventilation mécanique, en respectant la qualité architecturale du bâtiment, permettant de gérer le taux de CO₂ et ainsi la qualité de l'air intérieur, l'intégration de pare-soleils, l'amélioration des fenêtres et l'isolation de l'enveloppe. L'exercice a montré qu'il était possible de réduire la demande de chaud de 129 kWh/m² à environ 40 kWh/m².

Une étude a également été réalisée sur une des plus anciennes universités européennes, l'Université de Pavie, en Italie, dont une grande partie a été construite avant la seconde guerre mondiale. Ont été étudiés à la fois les bâtiments historiques du IX^e au XIX^e siècle, et les plus récents du XX^e siècle grâce à un audit énergétique basé sur une méthode de calcul quasi-stationnaire et concentré sur la consommation d'énergie de chauffage. Il en est sorti que la consommation énergétique n'était ni corrélée à l'âge, ni à la forme du bâtiment. Ce modèle a permis de cibler les améliorations, leurs coûts ainsi que le délai de retour sur investissement. Trois types de rénovation ont été principalement étudiés : le changement des fenêtres, l'isolation du toit et la rénovation du système de chauffage. Le changement de fenêtres permettrait d'économiser 10% d'énergie mais pourrait nuire à l'intégrité du bâti ancien. L'isolation permet des économies de 14% pour le bâti ancien et 22% pour le contemporain. Pour ce qui est de la rénovation du système de chauffage, elle permettrait des économies d'énergie de 12% pour les bâtiments anciens et 16% pour ceux d'après-guerre. Considérant un temps de retour des investissements inférieur à 10 ans, il est possible d'améliorer une grande partie des immeubles grâce à une intervention sur le système de chauffage uniquement. L'isolation de la toiture représente un temps de retour trop élevé pour les bâtiments historiques (Margini et al., 2016).

Un deuxième cas a été étudié en Italie par Ascione et al. (2019). Cette étude se concentre sur l'Université de Molise, située dans le centre de l'Italie, à la suite d'enquêtes et d'évaluations sur site, un modèle de simulation dynamique a été réalisé grâce à un logiciel EnergyPlus (DesignBuilder) puis calibré grâce aux factures d'énergie. Divers scénarios de rénovations tels que la rénovation de l'enveloppe, du système HVAC et l'ajout de sources renouvelables ont été évalués par le modèle. Les auteurs ont souhaité évaluer l'impact des simplifications souvent réalisées dans ce genre d'études sur les performances énergétiques du bâtiment. Ceci permet de montrer l'influence des hypothèses dans le modèle sur les résultats.

L'université de Zagreb a également fait l'objet d'une étude d'amélioration de l'efficacité énergétique. 23 des 130 bâtiments ont été étudiés, parmi lesquels se trouvait l'un des plus grands de l'université, un bâtiment d'architecture moderne appartenant au patrimoine culturel protégé construit dans les années 1960, conçu par Albini, protagoniste de l'architecture moderne croate. Dans l'objectif d'obtenir un certificat de

performance énergétique, un audit énergétique a été réalisé. Suite à cela, des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique ont été proposées. Les mesures entreprises dans les années 80 d'isolation de la toiture plate n'ont pas été suffisantes. L'étude propose des mesures architecturales mais aussi des mesures liées aux équipements d'installation électrique et mécanique. Les analyses ont montré que la mesure la plus appropriée est la combinaison : isolation des murs et toitures, et le remplacement des portes et fenêtres. Ces mesures ne perturbent en rien l'aspect originel de la façade tout en permettant des économies d'énergie et une qualité de vie intérieure meilleure (Ostojic' et al., 2016).

En 2011, l'Université polytechnique de Milan a lancé le « *Città Studi Sustainable Campus* », un projet axé sur 3 grands principes, dans un objectif d'amélioration des performances énergétiques. La rénovation des bâtiments fait partie du projet. Deux bâtiments de l'université ont été analysés au niveau de leur performance énergétique grâce à des simulations numériques. Dans cette expérience, deux logiciels ont été comparés, CENED et Sefeira, ce qui a permis de montrer que la sélection du programme doit se faire en fonction des tâches et résultats que l'auteur souhaite atteindre avec l'outil (Sesana et al. 2016).

Ces études permettent de conclure que dans le cas de bâtiments patrimoniaux, chaque bâtiment est unique, il n'y a pas une seule solution qui conviendrait à tous. Elles soulignent l'importance des logiciels de simulation pour la prise de décisions des mesures à envisager dans le cas de la rénovation énergétique de bâtiments.

2.3.2 IMPACT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LA RÉNOVATION

Nombreux sont les chercheurs qui ont travaillé sur des cas concrets de bâtiments scolaires. Bien que les mesures d'économie d'énergie mises en oeuvre diffèrent d'un cas à l'autre, les résultats montrent qu'il est possible de réaliser des économies d'énergie remarquables sur ces établissements et cela, sans nuire à leur intégrité et valeur architecturale. Mais qu'en sera-t-il dans le futur ? Dans le cas où l'Europe n'aura pas réussi à atteindre les objectifs ciblés ? Des questions se posent quant aux mesures de rénovation entreprises aujourd'hui, seront-elles suffisantes pour demain ? Les systèmes seront-ils assez performants ? Tout simplement, les exigences seront-elles toujours respectées ?

La littérature existante est en hausse en ce qui concerne le réchauffement climatique et son impact sur les bâtiments et les systèmes qui y sont utilisés. Partout dans le monde, de nombreux scientifiques se sont intéressés à la question.

Wan et al. (2012) ont étudié l'impact du changement climatique sur l'utilisation d'énergie, dans des immeubles de bureaux, suivant deux scénarios d'émission dans 5 régions climatiques différentes de la Chine, et ce, grâce à l'outil VisualDOE4 pour la période 2001-2100. Il en est sorti que la demande de chaud diminuait d'environ 20%. Pour ce qui est de la demande de froid, elle augmente de 11 à 24% en fonction des régions étudiées. Le refroidissement étant assuré principalement par l'électricité, la demande d'électricité augmenterait et aggraverait les conditions climatiques. Les émissions de carbone, quant à elles, augmenteraient de 0,5% à 4,3% en fonction des régions, étant donné que la demande d'énergie pour le

refroidissement l'emporte sur l'économie d'énergie pour le chauffage. Ils ont alors comparé les résultats avec des résultats obtenus en cas de mesures d'amélioration sur l'enveloppe du bâtiment, par exemple. Cela a démontré que chaque cas devait être traité séparément en fonction des conditions climatiques dans lesquelles il se trouvait, la mesure d'atténuation pourrait s'avérer utile ou pas.

Yau et Hasbi (2017) se sont concentrés sur la charge de refroidissement qu'engendrerait le réchauffement climatique dans des régions tropicales et ont étudié un bâtiment de bureaux en Malaisie à l'aide du logiciel de simulation TRNSYS, pour les années 2000, 2020, 2030, 2050 et 2080. Comparée à l'année 2000, cette demande de froid augmente de 2,96% pour 2020 à 11,7% pour 2080, ce qui aboutirait à une diminution de l'efficacité et de la durabilité du système actuellement mis en place. Le système de climatisation actuel sera insuffisant à l'avenir, ce qui entraînera une surchauffe. Il n'est cependant pas conseillé de surdimensionner le système, de manière préventive car le surdimensionnement contribue à des coûts plus élevés, à une augmentation du niveau d'inconfort et surtout à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Aux Etats-Unis, Dirks et al. (2015) ont également étudié l'impact du réchauffement climatique cette fois-ci, sur la consommation d'énergie et les pics de demande, dans les bâtiments résidentiels et commerciaux, localisés dans la région d'Eastern Interconnection. Un logiciel d'EnergyPlus (BEND) a été utilisé pour les simulations des scénarios. Dans l'objectif d'obtenir des résultats les plus représentatifs possibles, environ 26 000 configurations de bâtiments ont fait l'objet de simulations dans des fuseaux horaires et régions différents ce qui résulte en 180 000 cas. Une autre particularité de cette étude résulte dans le fait que les données climatiques prennent en compte la durée et la fréquence d'événements météorologiques intenses. Comparée aux résultats de 2004, la demande de chaud diminue d'environ 11% à la fin du 21ème siècle, tandis que la demande de froid augmente considérablement, dans certaines régions elle vaudrait le double de la demande enregistrée en 2004. La combinaison des deux augmenterait de 38% en 2052 et de 130% en 2089. L'étude permet de se rendre compte que la variabilité des résultats, suivant les régions, est relativement large.

Mata et al. (2013) ont étudié l'impact du réchauffement climatique sur 389 bâtiments répartis dans trois grandes villes suédoises suivant 5 scénarios météorologiques et 13 mesures de rénovation comprenant des interventions sur l'enveloppe, le système de ventilation, l'éclairage, ... sur la période 1961-2100. Le modèle a été créé dans un logiciel de simulation dynamique développé par les auteurs. Il en est ressorti que l'amélioration de l'enveloppe et le remplacement des fenêtres pourraient diminuer de 30% la demande de chaud par périodes de 20 ans. Les auteurs soulignent l'importance des incertitudes climatiques qui ont une influence sur l'évaluation de la performance des bâtiments.

Andrić et al. (2017) se sont concentrés dans la zone européenne, ils ont évalué les impacts directs et indirects du changement climatique pour trois types de climats (tempéré, sous-tempéré, et polaire) dans le but d'évaluer la demande de chaleur. L'étude a été réalisée sur un bâtiment à appartements. Pour chaque type de climat, trois scénarios de réchauffement climatique (bas, moyen et élevé) défini par le GIEC ont été étudiés pour la période 2010-2050 et ce, par période de 10 ans. Le modèle a été créé dans Matlab puis validé en comparaison avec EnergyPlus (Design Builder). La particularité de cette étude est la prise en compte de la

rénovation des bâtiments. Des scénarios de rénovation ont été étudiés pour amener leur efficacité énergétique à celles qui seraient imposées dans les normes en 2020 étant donné que les bâtiments ne répondraient plus aux exigences à ce moment là, il en a été fait de même pour 2030, et ainsi de suite. Ils ont démontré que les résultats obtenus pour des scénarios de réchauffement différents sont peu variables lorsque les deux types d'impact sont considérés, pour les périodes suivantes, la rénovation influence encore moins la demande d'énergie du bâtiment. La demande de chaleur diminue de 18% à 21% en fonction des régions considérées.

Il en ressort de ces travaux que la demande de chaud évoluerait tout naturellement dans le sens d'une diminution, et la demande de refroidissement dans le sens d'une augmentation. Cependant, dans certaines régions, son évolution beaucoup plus grande que la diminution de la demande de chaud entraînerait une augmentation de la demande d'énergie et aggraverait de plus en plus la situation climatique. Ceci serait d'autant plus marqué dans les pays chauds. Il est cependant possible de réduire la demande d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre, en pensant le bâtiment de manière à ce qu'il s'adapte au changement climatique, grâce à l'utilisation de technologies permettant la conception de bâtiments économes en énergie.

Le réchauffement climatique a pour conséquence l'augmentation des heures de surchauffé et donc la dégradation du confort intérieur, élément important dans la construction aujourd'hui. L'augmentation considérable de la demande de froid est solutionnée par l'installation de systèmes de climatisation au sein des bâtiments. Ceci pousse les chercheurs à développer des solutions durables. C'est dans ce contexte que l'Annexe 80 (Resilient Cooling of Buildings) a été mis en place, l'objectif est de « *développer, évaluer et communiquer des solutions de refroidissement résilient et de protection contre la surchauffe* » comme on peut lire sur le site du comité d'EBC de l'Agence internationale de l'énergie (Energy in Buildings and Communities Programme, 2019, p.1), entendant par résilient une solution qui consomme peu d'énergie et produit une quantité de carbone relativement faible diminuant ainsi l'impact du système sur le réchauffement climatique. En effet, il ne s'agirait pas que les solutions adoptées aggravent la situation déjà considérée comme relativement critique. Des chercheurs partout dans le monde peuvent apporter leur contribution en proposant des solutions. A ce jour, l'Annexe 80 reprend une palette de solutions relativement large de systèmes de refroidissement résilients actifs, passifs et hybrides. Les solutions proposées permettent de « *réduire les gains de chaleur externes dans les environnements intérieurs, améliorer le confort personnel et éliminer la chaleur et l'humidité de l'environnement intérieur* » (Energy in Buildings and Communities Programme, 2019, p.5).

2.4 SCÉNARIOS DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

Dans son troisième et quatrième rapport, le GIEC (2007) a réalisé des projections du climat futur suivant certaines hypothèses telles que le mode de vie de la population ou encore l'évolution de la démographie. Ainsi, quatre familles de scénarios socio-économiques avaient été mises en évidence : A1, A2, B1 et B2, en fonction de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Ces modèles ont été utilisés par de nombreux scientifiques pour simuler l'avenir comme illustré dans la section précédente. Dans la synthèse du quatrième rapport à propos du changement climatique, le GIEC explique les différents scénarios (GIEC, 2007, p.44).

La famille A1 est caractérisé par « *une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète* » la population augmenterait jusqu'à atteindre 9 milliards à la moitié du 21ème siècle puis diminuerait. Le mode de vie dans différentes régions du monde se croiserait, l'utilisation de « *nouvelles technologies énergiquement efficace* » serait en hausse. Dans cette famille, il existe des variantes qui sont caractérisées par le type d'énergie utilisée. Par exemple, le scénario A1FI correspond à l'utilisation, principalement, d'énergie fossile. Le scénario A1B, quant à lui, équivaut à l'utilisation de diverses sources.

Dans le cas de la famille A2, au contraire, l'évolution mondiale est hétérogène. Le nombre d'individus augmenterait sans cesse jusqu'à atteindre 15 milliards de personnes. L'arrivée de nouvelles technologies serait également très différente en fonction des régions.

La famille B1, de la même manière que la famille A1, verrait sa population croître jusqu'au palier des 9 milliards puis diminuer « *mais avec une économie rapidement dominée par les services, les techniques de l'information et de la communication et dotée de technologies énergiquement efficaces.* » Il n'y aurait, dans ce scénario, aucune action entreprise en plus de celles imposées aujourd'hui pour diminuer le réchauffement climatique. Il représente un scénario beaucoup plus optimiste.

Enfin, la famille B2 correspond à un futur entre la famille A1 et A2 pour ce qui concerne l'économie et l'énergie. La démographie serait en continuelle croissance et atteindrait les 10 milliards d'habitants en 2100.

Dans son cinquième rapport, le dernier à ce jour, le GIEC (2014) a modifié son approche. Cette fois-ci, pour la création des futurs scénarios, les scientifiques ont établi quatre familles basées sur les émissions de gaz à effet de serre ainsi que le RCP (« *Representative Concentration Pathways* » qui se traduit par « *Profils représentatifs d'évolution de concentration* »). Ces quatre trajectoires se traduisent « *en termes de forçage radiatif, mesuré en W/m^2 , c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète* » en 2100, comparé aux valeurs de l'ère préindustrielle. Le bilan radiatif étant « *la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge ré-émis par la planète* », ce bilan évolue en fonction de divers éléments tels que la concentration dans l'atmosphère, de gaz à effet de serre. Ainsi, quatre scénarios de réchauffement climatique ont été mis en place, chacun se conforme à une progression différente du forçage radiatif. La valeur qui suit le RCP correspond au forçage radiatif qui serait atteint en 2100 (GIEC, 2014, p.99).

La comparaison des deux typologies de scénarios montre une convergence entre le RCP 8.5 de la A2, le RCP 6.0 et la A1B ainsi qu'entre le RCP 4.5 et la B1.

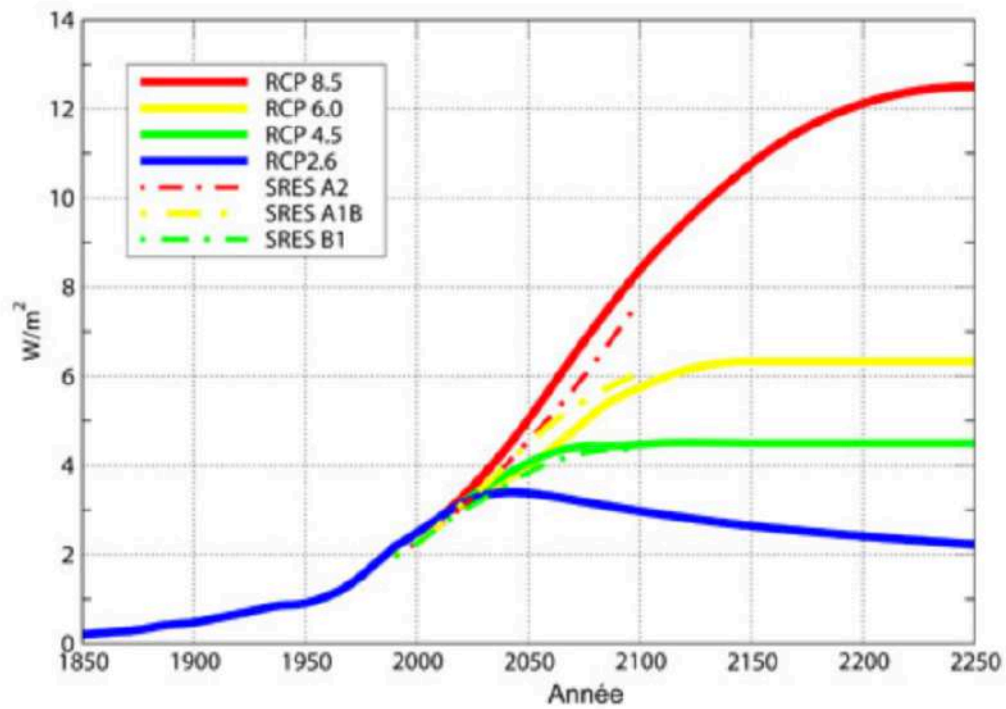


Figure 13- Variation du forçage radiatif en fonction du temps selon différents scénarios de changement climatique (GIEC, 2014)

Les simulations réalisées par Caroline Wyard (2015) à l'aide du modèle MAR, ont montré qu'en Belgique, ces scénarios se traduisent par une augmentation de la température de 0,7°C dans le cas du scénario le plus optimiste (RCP 2.6) et de 7,2°C, soit 10 fois plus élevée, dans le cas du scénario le plus pessimiste (RCP 8.5).

3. PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

3.1 HISTOIRE DU SART TILMAN

3.1.1 CAMPUS

Fondée en 1817, l'Université de Liège manque de place vers la fin du XIX^{ème} siècle. Ceci se traduit par un étalement de l'Université; d'abord dans des bâtiments disséminés dans la ville (Zoologie, Botanique, ...), puis vers un quartier universitaire, elle développe le campus du Val Benoit. La démocratisation de l'enseignement marquée, la pousse à se doter, en 1959, de la forêt du Sart Tilman et d'en faire un Campus de 760 hectares dont un peu plus d'un tiers sont classés comme site naturel. Le Recteur Marcel Dubuisson, accompagné d'architectes coordonnés par Claude Strebelle, entament une réflexion autour de l'urbanisme et de l'architecture du site (Micha, 2000).

« La conception de la nouvelle université au Sart Tilman vise trois objectifs : l'harmonie entre l'architecture et le site en préservant au maximum les zones boisées, l'ouverture du campus au public par l'aménagement de chemins de randonnées, l'intégration d'œuvres d'art mais aussi la création d'un parc industriel, et enfin le maintien de liens dynamiques entre le centre ville et le domaine universitaire. » (Micha et House, s.d.).

3.1.2 ARCHITECTURE

L'histoire de l'architecture du Sart-Tilman se décline en trois périodes architecturales (Frankignoulle, 2014, p. 3-5) : La première phase (1960-1970) se caractérise par la construction de bâtiments modernes caractérisés par des volumes relativement simples avec des toitures plates et l'utilisation du béton sous différentes textures. L'atelier d'architecture signé Strebelle et le magasin de livres conçu par l'architecte Charles Vandenhove ont été les premiers bâtiments à être construits sur le site. C'est en 1967 que l'Université inaugurera le Campus. Suivent la construction de la centrale de chauffe du poste central de commande, à la fin de la décennie. En 1968, fût inauguré l'Institut de Botanique, le bâtiment est signé Roger Bastin. Une grande partie de ces bâtiments sont, aujourd'hui, inscrits à l'inventaire patrimonial.

La seconde phase (1970-1990) est marquée par une rupture avec l'architecture simple de la première. La brique fait son apparition, les toitures ne sont plus plates et les volumes moins simples.

La dernière phase commence en 1991 avec l'obtention d'un financement de la communauté française. L'Université a alors pu s'étendre avec l'inauguration de nombreux bâtiments parmi lesquels on compte les amphithéâtres de l'Europe, l'Institut du Génie civil, le bâtiment Trifacultaire, ...

Aujourd'hui, le développement durable, comme la maîtrise des coûts de l'énergie sont des enjeux d'une importance majeure, ces constructions de l'époque ne répondent plus aux nouvelles exigences, bien qu'à cette période là, les architectes aient pensé la plupart de ces bâtiments de manière à ce qu'ils puissent s'adapter à l'évolution. Selon Frankignoulle, trois types de problèmes sont rencontrés: « *adaptation aux nouvelles exigences, correction des erreurs et isolation des constructions* » (Frankignoulle, 2014, p.7).

3.2 L'INSTITUT DE BOTANIQUE BÂTIMENT B22

L'Institut de Botanique conçu par Roger Bastin, et inauguré en 1968 se présente sous une forme relativement simple comme la plupart des bâtiments scientifiques construits durant ces années. C'est un volume à la forme d'un parallélépipède rectangle avec des ouvertures percées de manière régulière. L'architecte a joué sur deux niveaux de terrain pour la disposition des volumes au vu de la nature accidentée du terrain, l'intégration au site constituait un des soucis majeurs de l'architecte. Le bâtiment, de style moderne, avait été étudié de manière à répondre au mieux aux exigences fonctionnelles des utilisateurs. L'utilisation du béton brut laissé apparent à l'intérieur renforce la pureté de sa forme (Micha, 2000).

Ne répondant plus aux exigences et étant d'importants consommateurs d'énergie, le bâtiment de botanique, et d'autres constructions de la même époque ont fait l'objet d'une rénovation. Suite aux analyses réalisées sur le bâtiment, de nombreuses mesures permettant l'économie d'énergie ont été proposées. Les études ont montré l'efficacité des travaux, sur l'enveloppe du bâtiment, sur l'économie d'énergie. L'idée d'une isolation thermique a été relevée, ce qui a engendré des réflexions sur l'aspect architectural du résultat final et le compromis entre la préservation du patrimoine et l'aspect coût et énergie (Marique et Prégardien, 2019). « *Comprendre la relation entre la matière, la structure et la réalité constructive est fondamental pour bien orienter les options de rénovation sans perdre l'âme de ce patrimoine* » (Marique et Prégardien, 2019, p.1). Dans le cas de l'Institut de Botanique, la rénovation ne permettant pas de conserver son aspect originel, une réinterprétation des spécificités du bâtiment, lors du choix du revêtement de façade, a permis de réaliser une intervention respectueuse. Le bâtiment a donc été isolé par l'extérieur, puis recouvert d'un nouveau revêtement en bois récupéré, permettant une réinterprétation de l'ancienne texture : « *la bataille entre la matière et l'ouvrier qui donne une texture imparfaite se déplace dans la matière recyclée qui propose un nouveau type d'imperfection (imperfection d'une utilisation ultérieure)* ». Bien qu'utilisé pour des raisons de durabilité, l'idée était de marquer sur ce bâtiment la valeur de son âge car « *cet édifice de 50 ans a une patine, la marque du temps qui passe* » (Marique et Prégardien, 2019, p.8).

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique, l'Union européenne a mis en place l'European Energy Efficiency Fund (EEEF) dans l'objectif de protéger le climat par la mise en place d'un marché d'énergie durable. Ces financements concernent les Etats membres de l'Union européenne et ont pour but de réaliser des économies d'énergie, et de diminuer les émissions de gaz à effet de serre dans un souci de promouvoir une utilisation écologique de l'énergie (EEEF, s.d.).

A l'Université de Liège, un programme de rénovation énergétique concernant 11 bâtiments a été mis en place. 1,5 million d'euros ont été investis par l'Union européenne dans les recherches préalables permettant

de modéliser les solutions techniques dans l'objectif d'améliorer les performances énergétiques de ces bâtiments. Ceux-ci ayant été les premiers à être construits sur le campus, au moment où les exigences de PEB étaient beaucoup moins contraignantes qu'aujourd'hui, ils représentent une grande partie de la consommation énergétique, elle est de l'ordre de 65%. « *Le but du programme est de réduire de minimum 20% les consommations énergétiques des bâtiments visés : -11,2% pour la consommation électrique et -49,7% de combustibles pour le chauffage. Ces économies d'énergie impacteront également les émissions de CO₂ à hauteur de 24,4%* », peut-on lire sur le site de l'Université de Liège (2014). L'Université de Liège a, quant à elle, financé 30 millions d'euros sur fonds propres. Au total, plus de 32 millions d'euros ont été investis dans le projet de rénovation des onze immeubles.

Le Fonds européen pour l'efficacité énergétique et l'Université de Liège ont donc imposé la rentabilité économique du projet de rénovation. EEEF a imposé une diminution de 20% de la consommation d'énergie. L'Université attend de ce projet qu'il rembourse les investissements dans un délai de 20 ans, grâce aux économies d'énergie que le projet aura permises (Prégardien et Marique, 2019).

Le graphique de la Figure 14 montre la répartition des investissements en fonction des bâtiments et du type des travaux réalisés. La grande majorité a été utilisée pour rénover l'enveloppe des bâtiments. L'Institut de Botanique a subi des travaux d'isolation de l'enveloppe, suivi de la pose d'un nouveau revêtement. Des travaux sur les systèmes HVAC et électrique ont également été réalisés. Des panneaux photovoltaïques, sources d'énergies renouvelables, ont été installés sur les toits du bâtiment.

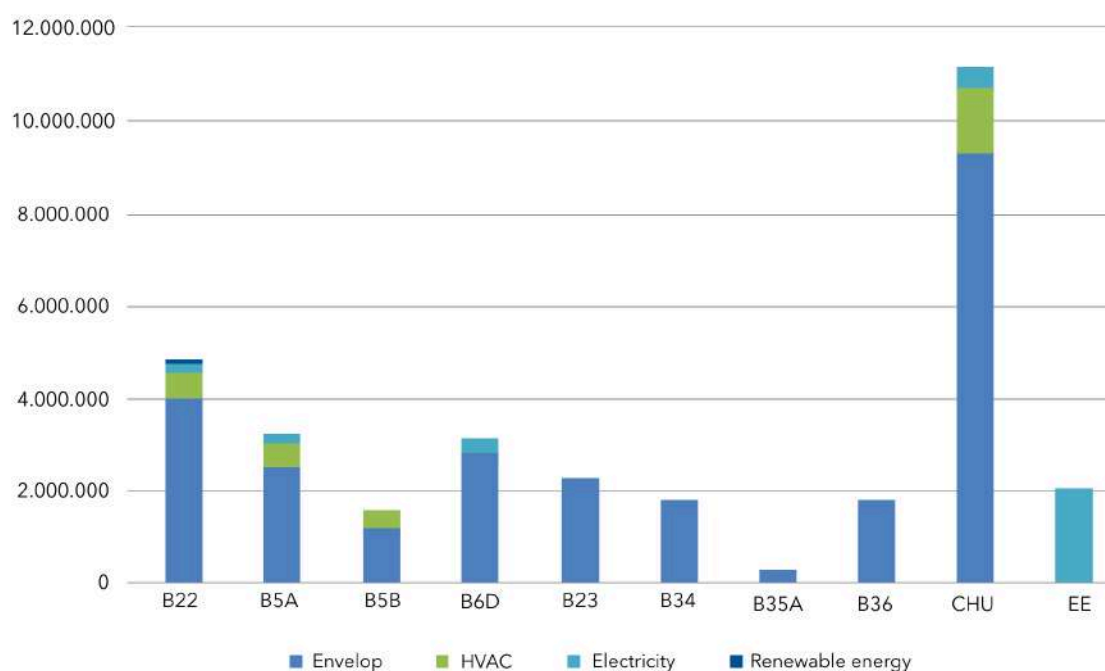


Figure 14 - Répartition des investissements en fonction des bâtiments et du type de rénovation (Prégardien et Marique, 2019)

Au total, sur l'ensemble du projet, les économies d'énergie représentent 12 219 MWh/an, les économies d'électricité, 2 823 MWh/an, comme illustré à la Figure 15. Les économies sont de l'ordre de 13% pour les consommations en électricité, et de 35% en ce qui concerne les consommations en chaleur. En énergie

primaire, cela équivaut à une économie d'énergie de 9 277 MWh et de tonnes de CO₂ équivalent à 2 718 par an (Université de Liège, 2018).

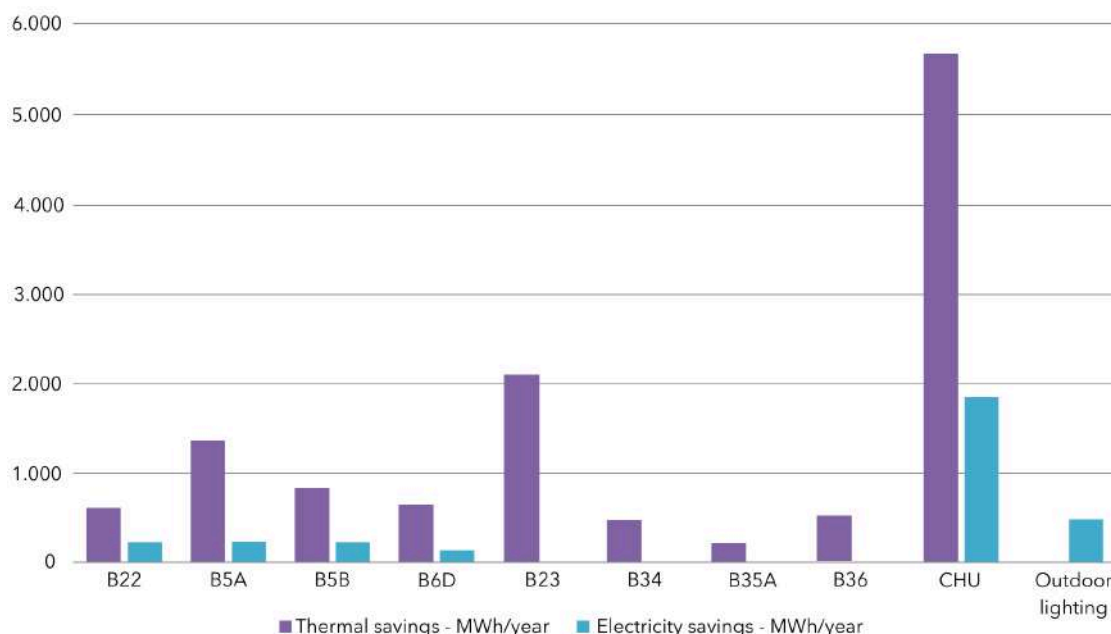


Figure 15 - Répartition des économies d'énergie réalisées par bâtiment en fonction du type d'énergie en MWh/an (Prégardien et Marique, 2019)

Dans le projet de rénovation de l'Institut de Botanique, plusieurs formes de réemploi ont été utilisées. Le revêtement des façades est en bois Barnwood réutilisé, plusieurs éléments du bâtiment comme le revêtement métallique en toiture ont été démontés, nettoyés et remplacés, et enfin et surtout, l'idée d'une rénovation, à la place d'une démolition, suivie d'une construction peut également être considérée comme une forme de réutilisation. En 2018, le prix Belgian Energy Award a été attribué au projet (Prégardien et Marique, 2019).



Figure 16 - Photos avant (gauche) et après (droite) rénovation (J.-L. Deru & S. Defourny)

4. OBJECTIFS

Au vu des enjeux climatiques, et de l'impact du secteur de la construction sur le réchauffement climatique, des exigences en termes de performance énergétique ont été imposées à l'échelle européenne et nationale sur les bâtiments. C'est dans ce contexte que la rénovation de bâtiments anciens est en hausse continue. L'objectif de ce travail se décline en deux axes.

Dans un premier temps, une évaluation des performances des solutions adoptées, dans le cadre de la rénovation d'un bâtiment historique et la qualité de l'intervention, sera réalisée grâce à une analyse des performances énergétiques du bâtiment avant et après la mise en oeuvre des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. Le travail portera sur un cas d'étude, le bâtiment B22 de l'Institut de Botanique de l'Université de Liège, qui a été soumis à une rénovation énergétique en 2017 dans le cadre du projet EEEF. Les travaux de rénovation étant finalisés, il est désormais possible d'émettre un retour critique sur les résultats de la réalisation. La phase de recherche et d'étude ayant été financée par EEEF, une diminution de la consommation d'énergie de minimum 20% a été exigée suite à sa participation à la politique 20/20/20 de l'UE. Il est donc intéressant de quantifier la rentabilité énergétique de la stratégie de rénovation mise en place.

Bien que des objectifs aient été mis en place à l'échelle européenne et locale pour diminuer les gaz à effet de serre, le réchauffement climatique est un fait. Ces objectifs permettront peut-être de le réduire mais pas de l'annuler. Analyser la réaction des bâtiments au changement climatique permettrait de quantifier les changements de consommation d'énergie, et donc les émissions de carbone. Ce qui à son tour permettrait de quantifier l'impact sur le climat. Les études énumérées dans la seconde section démontrent que le réchauffement climatique engendrerait une diminution de la demande énergétique de chauffage en hiver, et une augmentation de la demande de froid en période estivale. Mais il a été illustré que l'ampleur de l'augmentation du refroidissement et la diminution du chauffage diffèrent fortement d'une région à l'autre, en fonction des conditions météorologiques.

Dans la seconde partie, l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment sera donc évalué suivant des scénarios futurs de changement climatique. Cette étude permettra de répondre à la question qui suit : les mesures de rénovation entreprises aujourd'hui seront-elles suffisantes pour demain ? Il est intéressant de savoir jusque quand les systèmes mis en place suffiront à subvenir aux exigences en termes de confort, mais aussi aux normes d'efficacité énergétique. Ne serait-il pas intéressant d'intégrer le réchauffement climatique futur dès la phase de programmation de la rénovation ?

Cette approche pourrait être mise en oeuvre dans le cadre d'un diagnostic d'autres bâtiments historiques. Les résultats de l'impact du réchauffement climatique sur les performances énergétiques du bâtiment pourraient être utiles aux décideurs, en ce qui concerne la politique climatique et énergétique.

5. MÉTHODOLOGIE

5.1 AUDIT ÉNERGÉTIQUE

Dans l'objectif de mesurer les résultats de la rénovation énergétique sur le bâtiment, un audit énergétique sera réalisé. Il existe 4 types d'audit, dans le cadre de ce travail, c'est un audit énergétique détaillé qui sera mis en place. Il se décline en 4 étapes (Krarti et Marchio, 2016).

Une première étape consiste à collecter les données sur le bâtiment et les installations : plans, factures,... suivi d'une analyse des caractéristiques de ces installations et du profil de consommation énergétique. Dans un second temps, une enquête sur site va permettre de cibler les besoins des utilisateurs en termes de chauffage et de refroidissement, mais aussi en termes d'horaire d'occupation des locaux. Cette phase n'a malheureusement pas pu être réalisée au vu des conditions sanitaires actuelles. Ensuite un modèle sera réalisé et calibré à l'aide des données récupérées, il prendra en compte la présence des occupants et d'autres facteurs influençant la consommation énergétique du bâtiment. La dernière étape d'un audit énergétique est « l'évaluation des mesures d'énergies », dans le cadre de ce travail, le bâtiment étudié a déjà été soumis aux travaux de rénovation, il s'agit donc d'évaluer les apports de cette rénovation.

5.2 CHOIX DES LOGICIELS

5.2.1 DESIGNBUILDER

Le modèle de référence sera réalisé sur DesignBuilder, un logiciel de simulation dynamique. Ce programme a été employé par de nombreux chercheurs qui ont confirmé l'exactitude des résultats qu'il permet d'obtenir grâce à leurs études. Il a également été certifié par la norme ANSI / ASHRAE 140-20041, les tests ont comparé, à la fois les performances du programme avec d'autres du même type mais aussi celles d'EnergyPlus qui y est intégré. Son utilisation peut se faire sans quitter l'interface de DesignBuilder, ce qui constitue une force de ce logiciel (ASHRAE, 2006). EnergyPlus est un programme de simulation énergétique de bâtiments calculant les consommations d'énergie liées au chauffage, au refroidissement, à l'éclairage, à la ventilation, ... (EnergyPlus, s.d.).

Son interface 3D et les nombreuses fonctionnalités proposées ont été déterminants dans le choix. La simulation dynamique réalisée via ce logiciel prend en compte, l'influence d'éléments internes et externes comme les installations de chauffage, le système de contrôle, le climat, les gains solaires, et moult paramètres sur le bâtiment, mais aussi sur le confort thermique des utilisateurs.

5.2.2 MAR

La création des données météorologiques a été réalisée à l'aide du modèle climatique régional, le MAR, par des chercheurs du département de topologie et de topoclimatologie de l'Université de Liège. Ce programme, initialement développé à la fin du 20ème siècle, pour étudier les climats polaires et plus précisément l'évolution de la fonte de calottes glaciaires, est utilisé, depuis peu, en Belgique. Dans le cadre de sa thèse de doctorat réalisée en 2019, Coraline Wyard a tenté de prouver l'efficacité, la justesse et la valeur ajoutée du modèle atmosphérique régional, en l'appliquant à la Belgique. En comparant les résultats simulés avec de réelles mesures réalisées à différentes stations météorologiques belges, elle a démontré l'efficacité du MAR (Wyard, 2019).

5.3 RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE ET IMPACT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LE BÂTIMENT

Le modèle mis en place permettra de quantifier le résultat de la rénovation énergétique, à posteriori, entrepris par l'Université sur le bâtiment. Pour ce faire, un premier modèle de la situation avant rénovation sera créé, puis calibré à l'aide des informations à disposition pour la période avant rénovation : factures, données météorologiques, ... Ensuite, un second modèle de la situation après rénovation énergétique sera réalisé à partir du premier modèle, également calibré à partir de données de cette période. Les données météorologiques de ces périodes étant différentes, les modèles ne peuvent pas être directement comparés. Une troisième étape consiste à implémenter dans le premier modèle, les données météorologiques utilisées pour le second.

Dans un second temps, dans le but de mesurer l'impact du changement climatique sur le bâtiment et de quantifier la « robustesse » du bâtiment et des systèmes de chauffage et de refroidissement mis en place dans les années à venir, le scénario futur de réchauffement climatique le plus pessimiste (RCP 8.5) sera utilisé pour réaliser des simulations de consommation.

Le travail se déclinera donc en 4 étapes telles qu'illustrées à la Figure 17 : une étape de mise en contexte avec la définition des travaux qui ont été réalisés sur les mêmes sujets, présentés dans la partie « Etat de l'art », les objectifs du travail et la présentation du cas d'étude; suivi de l'analyse des données avec la présentation des caractéristiques du bâtiment et des divers documents et analyses à disposition, qui vont aider à la recherche. La troisième étape consiste en la réalisation des modèles de simulation et leur étalonnage suivis de l'introduction des données climatiques des divers scénarios permettant de quantifier l'impact du réchauffement climatique. Pour terminer, les résultats seront analysés à deux niveaux. D'une part, l'impact de la rénovation énergétique sur la consommation énergétique, l'environnement et le confort intérieur sera étudié. Et enfin, l'intention se portera sur l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment.

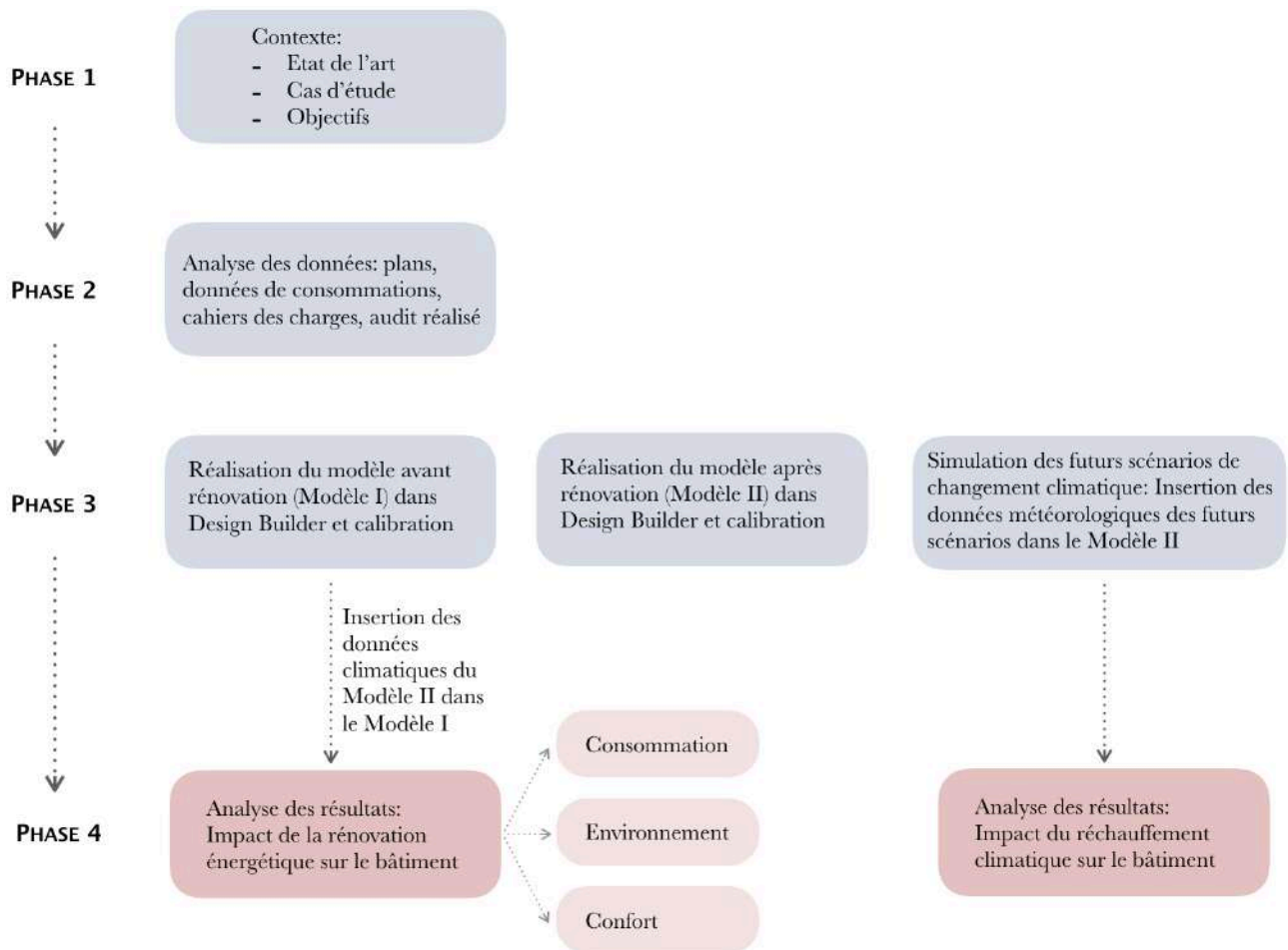


Figure 17 - Méthodologie de travail

6. ETUDE DU BÂTIMENT

6.1 ETUDES RÉALISÉES

Dans l'objectif de rénover le bâtiment B22 de l'Institut de Botanique, de nombreuses études ont été réalisées pour un choix pertinent des travaux de rénovation.

En 2015, un pré-audit énergétique réalisé par Teen Consulting, à l'aide de données des années 2013 et 2014, a conclu que la consommation électrique restait constante au cours de l'année, elle vaut 192,78 kWh/m²/an avec l'éclairage qui représente une grande partie de la consommation. La consommation de chaleur vaut 89,20 kWh/m²/an, le chauffage et la ventilation constituant une grande part de cette consommation. Le bâtiment est source de nombreuses déperditions thermiques, la ventilation constitue la source la plus importante de pertes énergétiques suivie de l'infiltration d'air (Teen Consulting, 2015).

Le bureau a proposé une série de mesures d'amélioration des performances énergétiques du bâtiment. Parmi celles-ci, on retrouve l'isolation de l'enveloppe et le remplacement des châssis permettant de limiter les pertes thermiques. En ce qui concerne les systèmes de ventilation, les mesures visent à remplacer la plupart par des systèmes plus performants, et à calorifuger les accessoires qui y sont liés, sources de perte de chaleur ainsi que le remplacement du système de régulation pour une meilleure gestion de la production en fonction de la demande. L'installation de panneaux solaires photovoltaïques, permettant de produire une part de la consommation en électricité du bâtiment, et de systèmes de comptage énergétique a également été suggérée. *« Une politique d'U.R.E. (utilisation rationnelle de l'énergie) passe obligatoirement par un comptage énergétique performant. De plus, le suivi et la gestion des consommations énergétiques d'un bâtiment ne seront efficaces que si l'on connaît, de la manière la plus précise possible, l'évolution et la répartition de ces consommations. »* peut-on lire dans le rapport final (Teen Consulting, p.86, 2015). Trois scénarios de rénovation ont été proposés par le bureau, pour chacun d'entre eux les consommations d'énergie finale, d'énergie primaire, le coût ainsi que le gain qu'ils permettent de réaliser ont été calculés.

Sur base de cela, le laboratoire de Thermodynamique Appliquée de l'Université de Liège a été chargé de la réalisation d'un modèle du bâtiment permettant d'évaluer les consommations énergétiques, ainsi que les diminutions espérées de ces consommations à la suite des travaux de rénovation énergétique prévues dans le cadre du Projet EEEF. Afin de calibrer le modèle, et d'estimer les bénéfices de cette rénovation, une campagne de mesures a été réalisée, des instruments de comptage ont été installés dans le bâtiment (Dewallef et al., 2015).

Le rapport intermédiaire, réalisé par François Randaxhe, (2016) reprend l'analyse de la consommation électrique et de chaleur qui lui ont permis de cibler les compteurs électriques, et de chaleur, nécessaires pour un calibration correct du modèle réalisé. Ensuite, sur base des données géométriques et techniques du

rapport de Teen Consulting, le modèle a été réalisé suivant un zonage et des hypothèses sur le logiciel de simulation SimAudit via l'interface Matlab. Le modèle pré-calibré permet d'avoir une idée des consommations et d'évaluer les mesures de rénovation proposées par le bureau Teen Consulting dans le rapport de pré-audit ainsi que celles proposées par le laboratoire. Ceci étant fait, les mesures les plus pertinentes ont été sélectionnées.

Dans un second temps, Damien Schyns (2016) a étudié, à l'aide de deux modèles de simulation calibrés, « *l'impact d'une diminution de la consommation sur le fonctionnement du réseau de distribution de chaleur du campus du Sart-Tilman et la centrale biomasse à cogénération* » sur tous les bâtiments faisant parti du projet EEEF, dont l'objectif est une réduction de la consommation énergétique de 20%: « *chimie (B5a et B5b), physique (B6a, B6b, B6c et B6d), botanique (B22) et le CHU (B23, B34, B35, B36, Tour 1, Tour 2, Bloc Central et RMN)* » (Schyns, p.24, 2016). Cinq scénarios de travaux de rénovation ont été évalués.

Les résultats des simulations ont montré qu'une réduction de la consommation d'énergie de 20%, comme imposée par le projet EEEF, engendrerait une baisse de la consommation d'environ 9 000 MWh, et du coût de chauffage de 400 000 €/an. Une plus grande diminution de la consommation augmenterait le temps de retour sur investissement étant donné que « *le gain marginal sur chaque MWh économisé diminue au fur et à mesure que la consommation des bâtiments est diminuée* » (Schyns, 2016, p.34).

Après la rénovation énergétique du bâtiment, un suivi continu de sa consommation est nécessaire. Pour cela, il avait été prévu que le modèle réalisé sur SimAudit devrait être calibré en continu, permettant ainsi d'évaluer les économies, en termes d'énergie et de coût, entraînées par la rénovation. Dans ce travail, comme énoncé dans la partie 4, un modèle de simulation réalisé dans le logiciel DesignBuilder permettra d'évaluer l'impact des travaux de rénovation sur le bâtiment.

6.2 PRÉSENTATION DU BÂTIMENT

La présentation du bâtiment est basée sur les études réalisées sur le bâtiment avant la rénovation, ainsi que sur les informations reçues de l'Administration des Ressources Immobilières du Sart Tilman. Les informations proviennent, principalement, du pré-audit énergétique réalisé par le bureau Teen Consulting et des études entreprises par le Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. Cette partie regroupe les données introduites dans le Modèle I réalisé dans DesignBuilder.

6.2.1 AFFECTATION ET OCCUPATION

La construction du bâtiment B22 de l'institut de Botanique de l'Université de Liège date de 1968. L'établissement se déploie sur 6 niveaux dont 2 niveaux enterrés en partie (sur la façade Nord-Ouest et une partie de la façade Sud-Ouest). Il regroupe de nombreux locaux destinés à des fonctions différentes, on y retrouve des salles de laboratoires, quelques salles de cours, des chambres de culture, des chambres froides,

des bureaux, un auditoire, une bibliothèque, ... La majorité des espaces techniques se localisent principalement au niveau -2. Entre le rez-de-chaussée et le niveau +1, un niveau technique permet le passage des gaines.

Le B22 fait partie d'un complexe regroupant 3 autres bâtiments, comme illustré à la Figure 18. Il est occupé en semaine par les chercheurs, professeurs et étudiants de 8h00 à 17h00.



Figure 18 - Schéma d'implantation (GoogleMaps, 2020)

6.2.2 ENERGIES DISPONIBLES

ELECTRICITÉ

L'ensemble du complexe est alimenté en électricité Haute Tension d'une valeur de 15 000 Volts. Les consommations électriques sont lues sur le compteur électrique haute tension SATEC situé dans les locaux techniques du B22 (niveau -2). Des compteurs sont positionnés après le compteur général, relevant ainsi la consommation de chacun des bâtiments. Un compteur reprend les consommations du B22, mais aussi celles du B40 comme montré à la Figure 19.

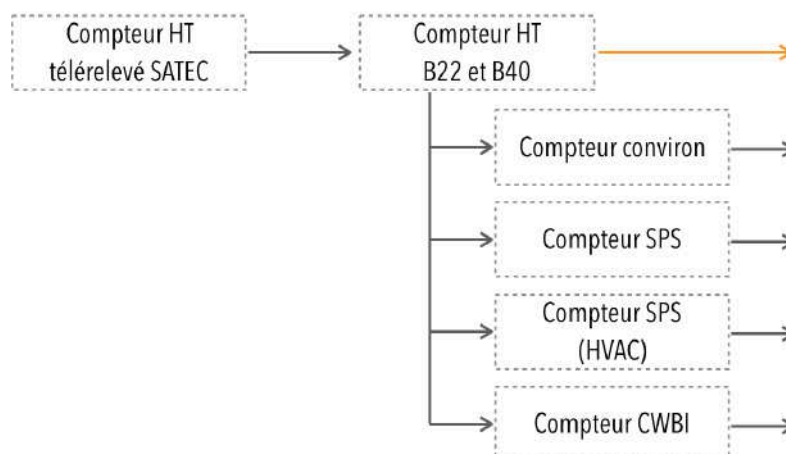


Figure 19 - Schéma des compteurs d'électricité (Teen Consulting, 2015)

GAZ

De la même manière que pour l'alimentation en électricité, l'alimentation en gaz se fait via un compteur localisé au niveau -2 du bâtiment qui fournit l'ensemble des bâtiments du site. Des compteurs supplémentaires relèveraient les consommations en gaz des différents établissements comme illustré à la Figure 20.

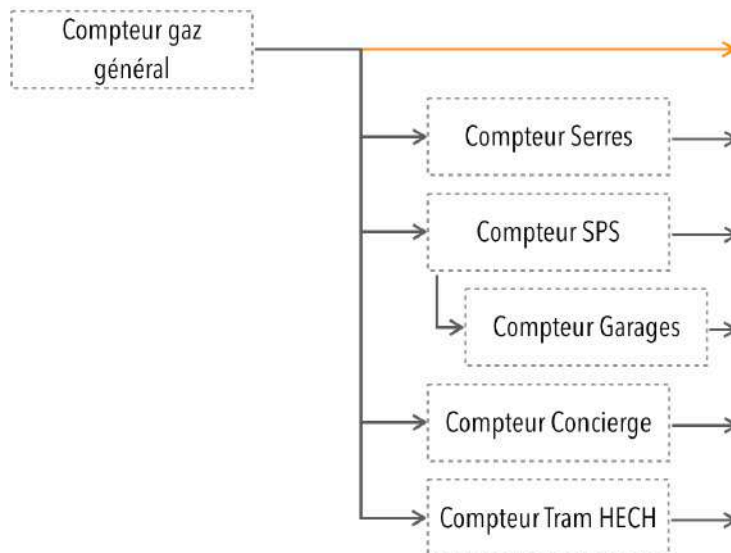


Figure 20 - Schéma des compteurs de gaz (Teen Consulting, 2015)

EAU

La centrale thermique du Campus approvisionne l'ensemble des bâtiments, y compris le B22, en eau chaude grâce à un réseau de chaleur. Depuis 2011, une cogénération biomasse s'est ajoutée aux trois chaudières bi-combustibles (mazout et gaz) de la chaufferie. Celle-ci possède une puissance de 7 MW, pour ce qui est des chaudières, deux d'entre elles ont une puissance de 20 MW et une de 15 MW (Université de Liège, 2011).

6.3 ANALYSE DE LA SITUATION AVANT RÉNOVATION

6.3.1 ENVELOPPE

TOITURE

Comme illustré sur la Figure 21, la toiture plate du bâtiment peut être sectionnée en trois zones en fonction de la composition. Le Tableau 1 reprend la composition des trois types de parois. La toiture a fait l'objet d'une rénovation en 2002, une isolation en laine de roche d'une épaisseur de 60 mm a été posée sur une grande partie.

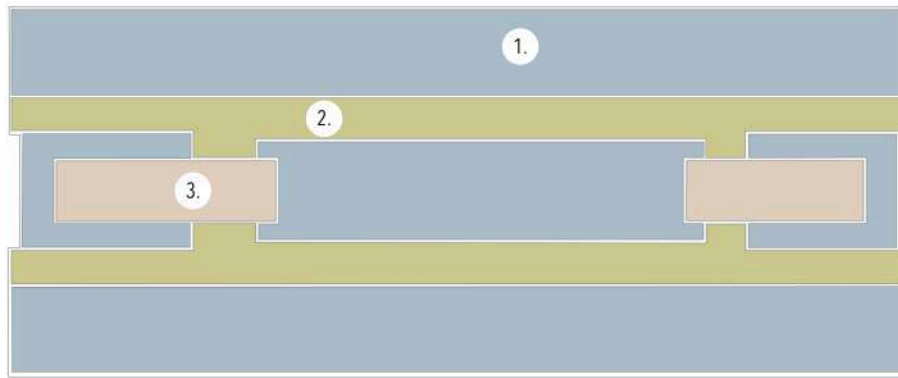


Figure 21 - Zonage de la toiture en fonction des parois

Paroi 1		Paroi 2		Paroi 3	
Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur
Etanchéité (Pare vapeur)		Etanchéité (Pare vapeur)		Chappe de pente, 1,5%	
Isolation laine de roche	60 mm	Isolation laine de roche	60 mm	Isolation héraclite	60 mm
Etanchéité		Etanchéité		Structure BA	100 mm
Chappe de pente, 1,5%		Structure BA	100 mm	Poutre porteuse BA	550 mm
Isolation héraclite	50 mm	Poutre porteuse BA	550 mm		
Structure BA	100 mm				
Poutre porteuse BA	550 mm				
U = 0,46 W/m²K		U = 0,96 W/m²K		U = 1,15 W/m²K	

Tableau 1 - Composition des différentes parois de la toiture

DALLE DE SOL

Au niveau -1, une partie de la dalle repose sur un vide ventilé, un espace non chauffé, l'autre partie repose sur une zone de locaux. Elle est constituée de béton d'une épaisseur de 400 mm. La dalle du niveau -2, constituée de 300 mm de béton, repose directement sur le sol. Le coefficient de transmission thermique U vaut 2,25 W/m²K pour la première paroi, et 2,5 W/m²K pour la seconde.

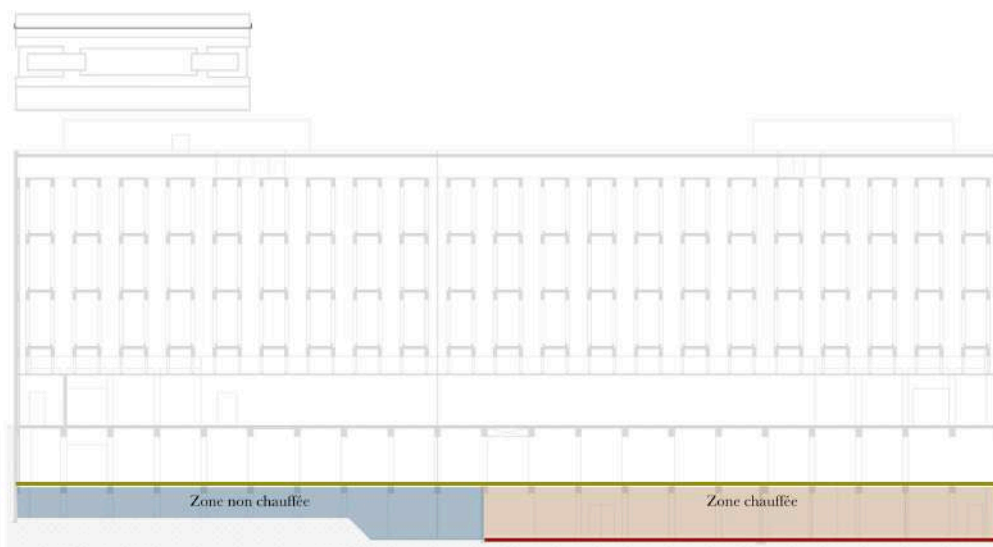


Figure 22 - Représentation des différents types de sols sur une coupe longitudinale du bâtiment

MURS EXTÉRIEURS

Il existe 5 types de parois extérieures, la Figure 23 représente un schéma des différentes parois, et le Tableau 2 reprend la composition de chacune d'elles. Les murs intérieurs sont principalement composés de blocs de béton.

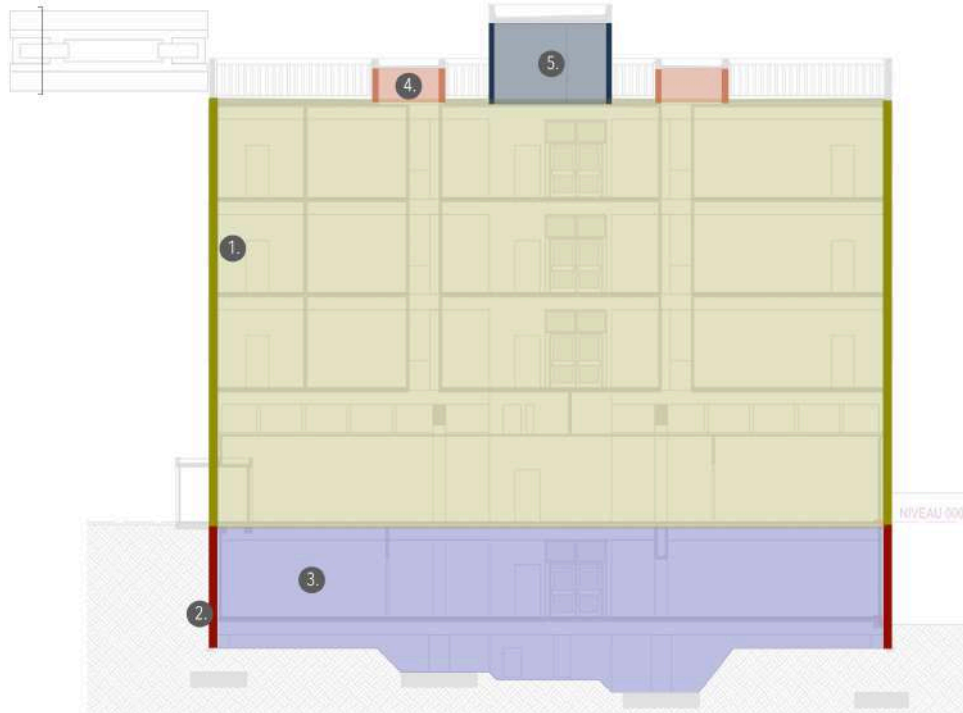


Figure 23 - Représentation des différents types de parois sur une coupe transversale du bâtiment

Paroi 1		Paroi 2		Paroi 3		Paroi 4		Paroi 5	
Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur	Elément	Epaisseur
Béton	200 mm	Béton	500 mm	Béton	200 mm	Béton	200 mm	Béton	200 mm
Bloc isolant cellulaire	100 mm			Air	50 mm	Structure porteuse SRN	38/100mm		
				Béton	100 mm	Panneau métallique			
U = 1,18 W/m²K		U = 1,63 W/m²K		U = 1,54 W/m²K		U = 2,88 W/m²K		U = 2,88 W/m²K	

Tableau 2 - Composition des différents types de murs

FENÊTRES

Les châssis sont en aluminium naturel avec un double vitrage. Le coefficient de transmission thermique U du vitrage vaut 2,86 W/m²K.

6.3.2 ECLAIRAGE

Le bâtiment est principalement éclairé par des tubes fluorescents de type T5 ou T8, voire même T12, ainsi que quelques ampoules économiques commandées par des interrupteurs.

6.3.3 CHAUFFAGE

Comme expliqué précédemment, la production de chaleur se fait dans la centrale thermique du Sart Tilman, alimentant ainsi presque l'entièreté des bâtiments situés sur le campus au travers de trois réseaux de chaleur, dont un qui fournit de l'eau chaude au B22. Deux échangeurs de chaleur, d'une puissance égale à 1 508 kW, installés au niveau -2 du bâtiment permettent de récupérer l'énergie thermique. L'eau arrive à une température de 115°C depuis le 3ème circuit de la chaufferie jusqu'aux deux échangeurs qui desservent les six circuits via un collecteur. Le schéma de la Figure 24 reprend le principe de fonctionnement de la distribution d'eau chaude. Les éléments en bleu représentent les circuits présents au sein du bâtiment.

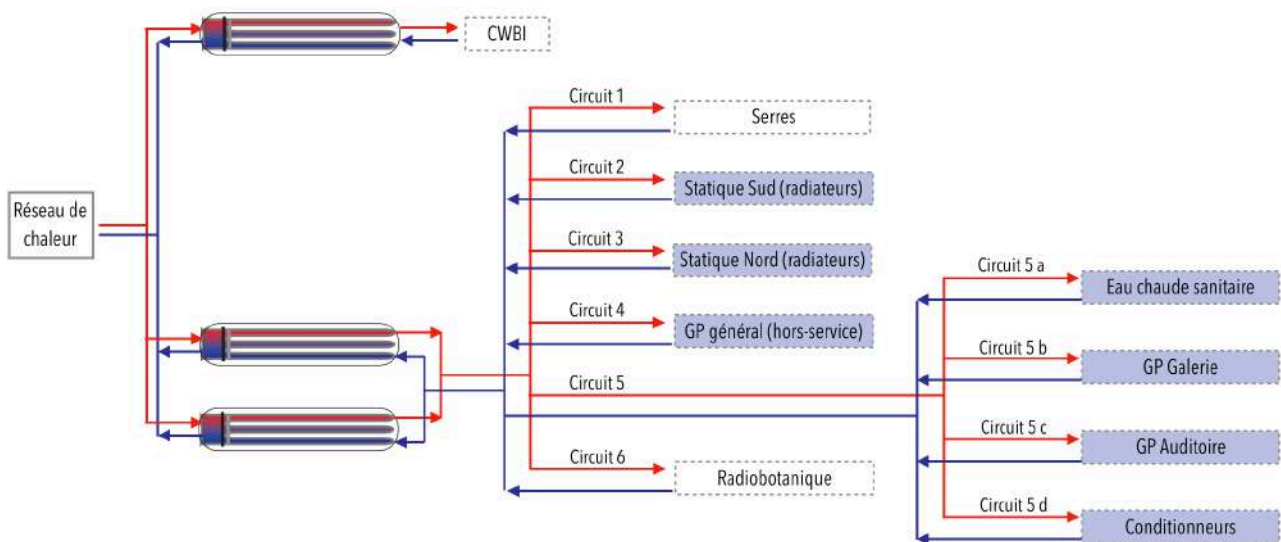


Figure 24 - Schéma de la distribution d'eau chaude dans le bâtiment

Dans le bâtiment, le chauffage est principalement assuré par des radiateurs mais aussi par la pulsion d'air chauffé à l'aide des batteries chaudes des groupes de pulsion et des conditionneurs d'air.

Une Gestion Technique Centralisée permet de réguler le bâtiment. Au niveau des radiateurs, une vanne 3 voies assure la régulation de la température de l'eau qui y circule en fonction de la température extérieure. Les circuits 2 et 3 fonctionnent de 8h à 17h, le circuit 5 fonctionne sans arrêt. Pour les circuits alimentant les radiateurs, des consignes de températures sont fixées: 20°C pour le circuit 2, et 21°C pour le circuit 3.

6.3.4 PRODUCTION D'EAU CHAUDE SANITAIRE

Un des échangeurs alimentés par l'eau chaude du circuit de chauffage permet de produire l'eau chaude sanitaire (circuit 5a) qui est stockée dans un ballon d'environ 2000 litres. Durant les mois où le chauffage ne fonctionne pas (juin à octobre), l'échangeur est remplacé par une résistance électrique d'une puissance de 4 kW.

De la même manière que pour le chauffage, la Gestion Technique Centralisée régule la température de l'eau : elle est fixée à 55°C, fonctionnant suivant un horaire fixe de 7h à 17h.

6.3.5 VENTILATION

Un système de ventilation assure la pulsion et l'extraction de l'air dans les pièces du bâtiment. L'amenée d'air dans la galerie et dans l'auditoire est réalisée par deux groupes, localisés dans le vide technique entre le R0 et le R+1. Dans ces deux pièces, il existe également deux groupes de traitement d'air. Dans le reste des espaces (classes, laboratoires, ...), c'est un groupe de pulsion général située au R-2 qui assure l'amenée d'air. Celle-ci se fait dans les différentes pièces, à travers des bouches de pulsion dans les murs ou au niveau des faux plafonds, les gaines se développent dans les vides techniques. L'extraction de l'air vicié et des hottes situées dans les laboratoires, se fait par 48 extracteurs au niveau de la toiture. Dans les différentes chambres de cultures, des groupes de conditionnement sont installés.

La régulation des groupes se fait par un horaire fixe : les conditionneurs et les hottes fonctionnent en continu, tandis que les groupes de ventilation général et celui de l'auditoire fonctionnent uniquement lors de l'occupation du bâtiment, à savoir du lundi au vendredi de 8h à 17h. Au moment où les consommations ont été relevées, le groupe de pulsion général était hors service, le groupe galerie était, quant à lui éteint depuis quelques années.

6.3.6 REFROIDISSEMENT

Le système de refroidissement est constitué d'une machine frigorifique d'une puissance de 340 kW combinée à une tour de refroidissement en toiture. Ce système permet d'assurer une température basse dans une partie des chambres froides. Le reste des chambres froides ont leur propre système de refroidissement indépendant du premier. Des split-systèmes permettent de climatiser deux salles de cours situés au premier étage.

6.3.7 AIR COMPRIMÉ

La production d'air comprimé est assurée par un système installé dans la sous-station. Il est composé de deux compresseurs, le premier d'une puissance de 5,5 kW et un second de 7,5 kW, d'un compresseur de réserve de

26 kW, d'un sècheur d'air comprimé pour réduire l'humidité de l'air, ainsi que de deux ballons permettant de stocker 2.500 litres.

6.4 TRAVAUX DE RÉNOVATION

A la suite des études réalisées par le bureau Teen Consulting et le Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège, des mesures de rénovation énergétique ont été mises en place dans le cadre du projet EEEF. Le but était de rendre le bâtiment conforme aux nouvelles législations telles que la PEB et le RGIE. Dans cette section est listé l'ensemble des travaux réalisés sur l'Institut de Botanique bâtiment B22 sur base du cahier spécial des charges, partie techniques spéciales regroupant les informations sur l'électricité et le système HVAC, et partie architecture. Dans le cas du B22, les travaux concernent principalement les systèmes HVAC, l'éclairage, l'enveloppe du bâtiment, en ce compris le remplacement des châssis et vitrages.

6.4.1 ENVELOPPE

L'enveloppe du bâtiment a subi une rénovation relativement importante.

TOITURE

L'ensemble de la toiture a été isolée et une étanchéité a été posée. La Figure 25 reprend l'ensemble des modifications effectuées.

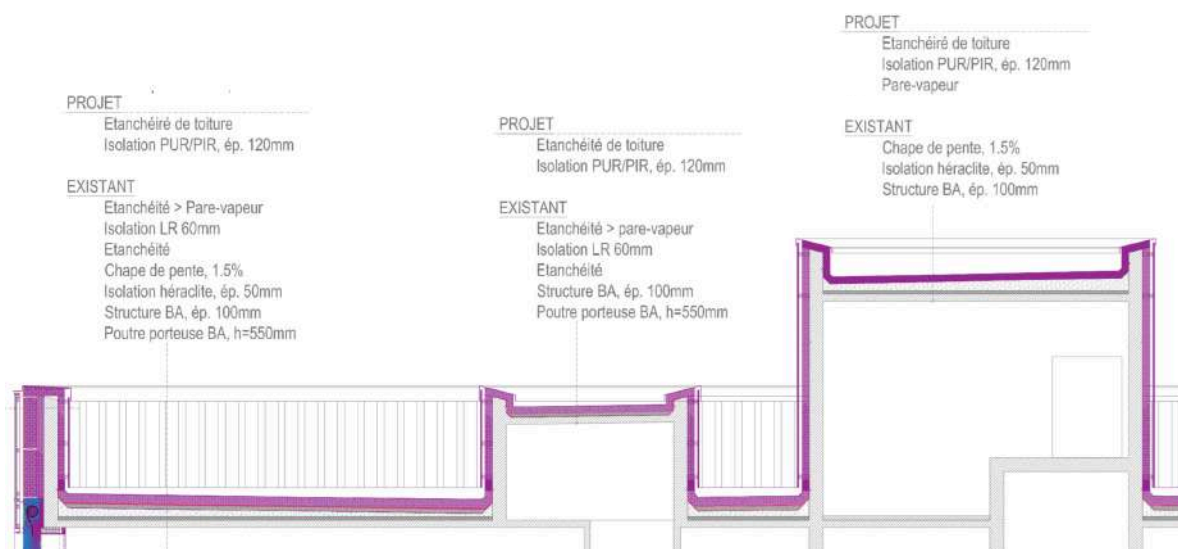


Figure 25 - Rénovation de la toiture (Administration des ressources Immobilières, 2016)

MURS EXTÉRIEURS

Les parties de murs enterrés ont été recouvertes, sur 1 m de profondeur, d'étanchéité puis isolées avec des panneaux de mousse en polyuréthane rigide d'une épaisseur allant de 60 à 160 mm, en fonction des endroits, et enrobées par une membrane de protection à pastille.

Pour les niveaux allant du +1 au +3, l'enveloppe a été recouverte d'isolation en laine de roche de 300 mm, dont une partie (200 mm) est entre la structure porteuse en ossature bois 60/200 mm, d'un pare-pluie, d'un contre lattage, d'un lattage et d'un bardage en planches de bois de réemploi comme illustré à la Figure 26.



Figure 26 - Rénovation des parois verticales des niveaux +1 à +3 (Administration des ressources Immobilières, 2016)

FENÊTRES

Au rez-de-chaussée, ainsi que dans les niveaux inférieurs, la façade rideau a été remplacée par des châssis en aluminium anodisé de teinte gris clair. Dans la partie vitrée, un triple vitrage avec un coefficient de transmission thermique $U=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ a été employé et, pour la partie pleine, des panneaux sandwich isolés en aluminium composés d'aluminium anodisé, d'isolation PUR/PIR d'une épaisseur de 40 mm, ainsi que d'isolation en laine de roche en remplissage intégral.

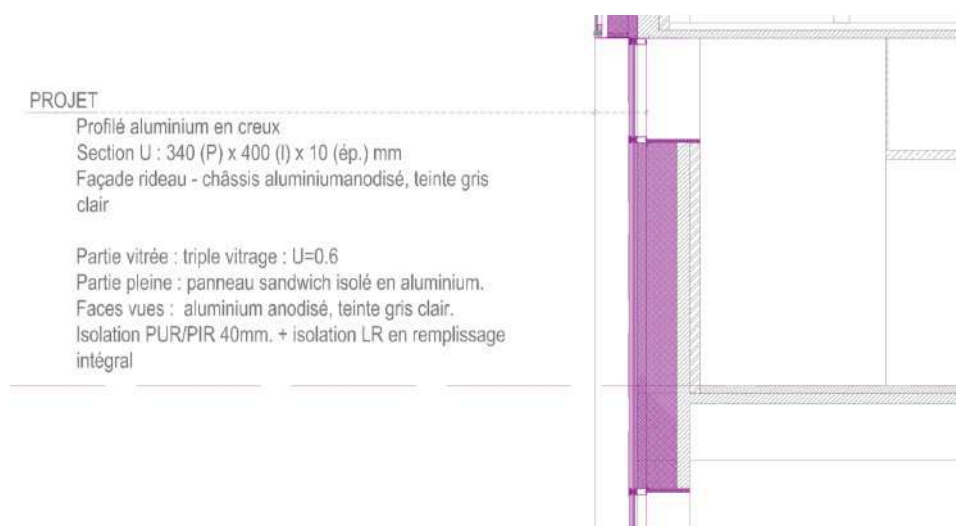


Figure 27 - Rénovation de la façade rideau (Administration des ressources Immobilières, 2016)

Les châssis des niveaux supérieurs ont également été remplacés par des châssis en aluminium anodisé avec triple vitrage ($U=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$). Sur la façade sud, des volets pare-soleil déroulant ont été placés aux fenêtres permettant de diminuer la surchauffe. La Figure 28 reprend le détail des châssis.



Figure 28 - Rénovation des châssis (Administration des ressources Immobilières, 2016)

6.4.2 ECLAIRAGE

Les luminaires ont été remplacés par des luminaires T5, à haute performance dans les espaces de circulation et sanitaires. Les anciens câbles, sans conducteur de terre, ont été remplacés par des nouveaux répondant aux exigences incendie.

De nouveaux éclairages et prises de courants ont été installés dans le hall au niveau 0, qui a été transformé en espace pour les étudiants.

6.4.3 HVAC

Les groupes de pulsion général de l'auditoire et de la galerie ont été remplacés par des nouveaux groupes. L'amenée d'air se fait par un groupe de pulsion général dont le débit est de 50 000 m³/h, un groupe de pulsion pour l'auditoire ayant pour débit 1 800 m³/h, et un troisième groupe de traitement d'air pour la galerie de 6 000 m³/h. Des nouveaux groupes d'extraction ont également été installés, remplaçant ceux démontés. Parmi ceux-ci, on retrouve deux groupes de débit 10 000 m³/h qui remplacent les groupes d'extraction Est et Ouest, ces extracteurs seront munis de batterie de récupération de chaleur.

Les extracteurs, ainsi que les équipements thermiques situés au sous-sol, sont contrôlés par la Gestion Technique Centralisée. Ces nouvelles installations sont conçues de telle sorte à ce que les débits puissent être commandés en fonction des locaux, à l'aide de régulateurs installés sur les réseaux de gaines.

Le système de production de froid a été remplacé par un groupe de froid compact muni de batterie de récupération thermique. Les trois compresseurs du groupe de production de froid ont également été remplacés par un groupe de froid compact.

Certaines gaines ont également été remplacées, étant donné qu'elles n'étaient pas calorifugées, ce qui engendrait des pertes d'énergie d'après le pré-audit de Teen Consulting.

Dans les locaux allant de 0/4 à 0/11, les radiateurs ont été démontés et remplacés par des convecteurs de sol avec une puissance calorifique de 500 W.

6.4.4 PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Sur une partie de la toiture, 4 rangées de 22 panneaux photovoltaïques d'une dimension de 1,6 x 1 m² ont été installés. La puissance minimale de l'ensemble des panneaux vaut 22 kWc. Dans le cahier spécial des charges ,on peut lire : « *Dans des conditions STC (standard test conditions : Ensoleillement de 1000 W/m², AM 1,5 et température des cellules : 25°C), la puissance d'un module de 1,6 m² aura une puissance minimale de 1.6 m² x 16 % x 1000 W = 256 W* » (Administration des Ressources Immobilières, 2016, p.232), l'ensemble des 88 modules aurait donc une puissance de 88 x 256 W = 22 538 W. Les panneaux sont reliés au bus bar qui alimente l'ensemble du B22.

6.5 ANALYSE DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES

L'analyse des consommations avant la rénovation va permettre de calibrer le Modèle I de simulation, dans le but de créer un modèle le plus proche de la réalité, un modèle à l'image de la consommation énergétique réelle. Les données analysées dans cette section proviennent du rapport d'analyse des consommations de François Randaxhe, ainsi que de fichiers rassemblant les valeurs mesurées par les différents compteurs installés à la suite de l'étude du Laboratoire de Thermodynamique, permettant un meilleur suivi des consommations du bâtiment. Les consommations en électricité et en chaleur sont analysées.

6.5.1 ELECTRICITÉ

Dans le bâtiment, parmi les équipements qui fonctionnent à l'électricité, on retrouve l'éclairage, la résistance électrique d'appoint permettant de chauffer l'eau chaude sanitaire lorsque le chauffage est à l'arrêt, les groupes de ventilation, la machine frigorifique, le système de production d'air comprimé, les appareils de laboratoire, et d'autres éléments techniques tels que l'ascenseur, ... La Figure 29, reconstituée sur base du rapport de François Randaxhe, représente le schéma de fonctionnement de la distribution de l'électricité de l'ensemble du complexe Botanique

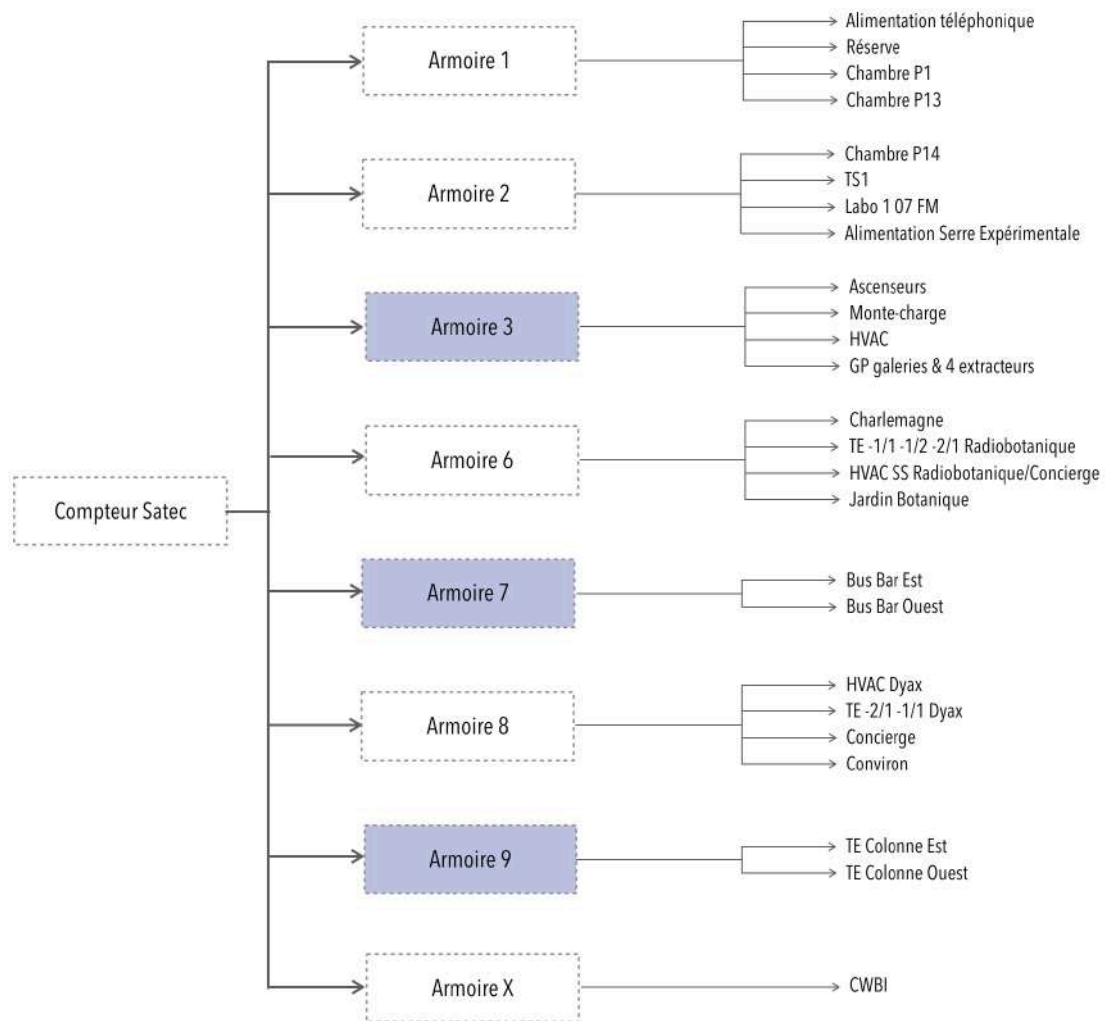


Figure 29 - Schéma de l'alimentation en électricité au sein de l'Institut de Botanique

La consommation électrique est relevée par le compteur SATEC. Cependant, comme il est possible de voir sur ce schéma, ces données reprennent, non seulement la consommation du B22, mais également du reste du complexe botanique. Uniquement les armoires 3, 7 et 9 reprennent la consommation du B22. L'armoire 3 alimente tout le système HVAC du bâtiment, c'est-à-dire les systèmes de refroidissement et de production d'air-comprimé, les groupes de pulsion et d'extraction, la résistance électrique de production d'eau chaude sanitaire, fonctionnant uniquement en dehors de la période pendant laquelle le bâtiment est chauffé par le circuit de chaleur, et les pompes pour la distribution d'eau chaude dans le bâtiment. L'armoire 7 alimente les équipements électriques ainsi que les chambres froides et de culture, et enfin, l'éclairage du bâtiment est alimenté par l'armoire 9.

Par ailleurs, dans la continuité de l'étude menée par François Randaxhe, le profil de puissance a été mesuré sur plusieurs tableaux électriques : les armoires 7 et 8, ainsi que les sous-stations enterrée et de chauffage, sur différentes périodes pendant l'année 2016. La sous-station enterrée reprend la consommation du système de refroidissement, et la sous-station de chauffage des pompes de chaleur, de la résistance électrique et des groupes de pulsion. Sur base de cela, un profil théorique a été estimé pour chaque tableau, ces profils ont permis de calculer, de manière théorique, la consommation annuelle totale. La consommation annuelle du

B22 uniquement vaudrait donc 836,71 MWh pour l'année 2016, cette valeur reste théorique mais pas loin de la réalité. Ces profils seront également utilisés dans la partie modélisation, dans le but de créer un modèle le plus proche de la réalité.

Dans son rapport, François Randaxhe a conclu, de l'analyse des consommations électriques, que le profil de puissance n'était pas fonction des conditions climatiques extérieures. Il a également souligné « *le peu d'influence du système HVAC [...] sur les consommations électriques* » (François Randaxhe, 2016, p.9).

Le graphe de la Figure 30, reprenant une superposition des profils de consommation en électricité mesuré au SATEC pour 5 années différentes, montre des profils relativement différents. On observe que c'est en 2017 que la consommation en électricité était la plus élevée, avec une puissance annuelle de 2 394 MWh, suivie de l'année 2015 avec 2 357 MWh, 2019 avec 2 131 MWh, et enfin de l'année 2018, avec une consommation de 2 045 MWh. Les travaux de rénovation ayant duré de mai 2017 à juillet 2018, ceci pourrait expliquer la consommation beaucoup plus élevée pour la fin de l'année 2017, et le fait qu'avant juillet 2018, il existe de fortes divergences avec le profil de consommation de l'année 2019. Tout ceci reste des hypothèses, d'autant plus que, comme expliqué plus haut, le SATEC ne reprend pas uniquement la consommation électrique du B22.

Lorsque l'on s'attarde sur la polyligne de l'année 2019, profil qui sera utilisé, plus tard, pour le calibration du modèle après rénovation, on observe que la consommation en période estivale est plus élevée qu'en période hivernale. La raison pourrait être le fait que, durant la période de l'année où la température extérieure est relativement élevée, le réseau de chaleur étant à l'arrêt, d'autres équipements, fonctionnant à l'électricité prennent le relais, comme par exemple la résistance électrique d'appoint assurant la production d'eau chaude sanitaire dans le bâtiment B22. De plus, le groupe de refroidissement nécessite plus d'énergie durant les périodes chaudes.

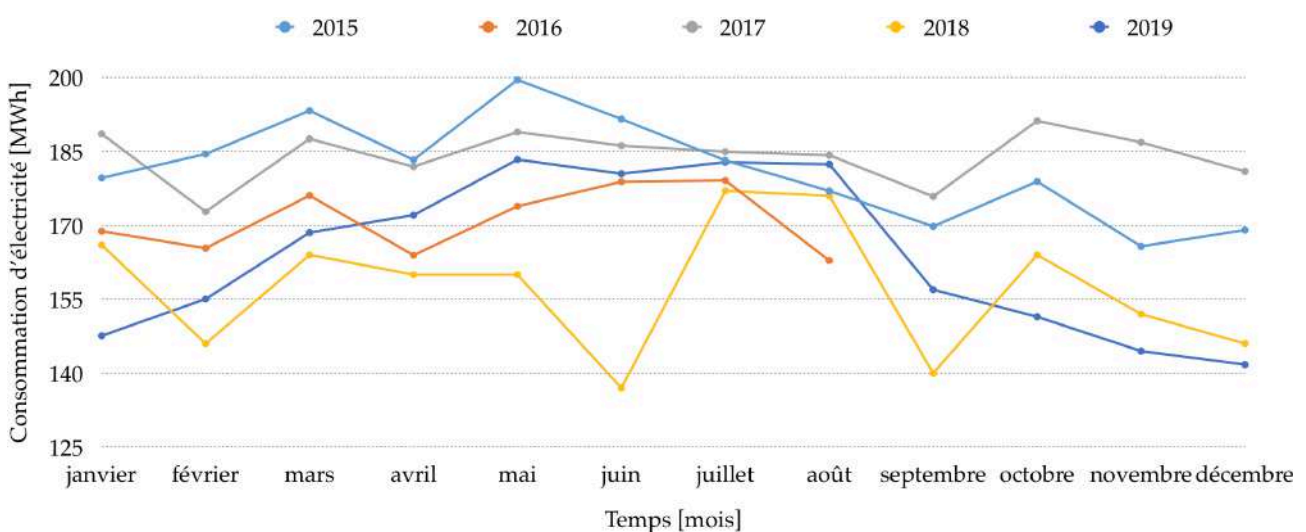


Figure 30 - Superposition des graphes de puissance électrique mensuelle mesurée au SATEC pour les années 2015 à 2019

6.5.2 CHALEUR

Le bâtiment est alimenté en eau chaude par la chaufferie de l'Université de Liège, l'eau arrive depuis le 3ème circuit de la chaufferie jusqu'aux deux échangeurs qui desservent les six circuits via un collecteur, tel qu'illustré à la Figure 31. A la suite de l'étude réalisée par François Randaxhe, des compteurs de chaleur ont été positionnés à la sortie des échangeurs. Le schéma reprend la position de ces compteurs. Les éléments en bleu constituent l'ensemble des consommations du bâtiment B22. Ainsi, pour obtenir la consommation, uniquement, du B22, la formule suivante sera appliquée :

$$Energie_{B22} = Energie_1 - (Energie_2 + Energie_4)$$

Le positionnement du compteur 3 avait pour seul but de mesurer la consommation des groupes de pulsion et des conditionneurs.

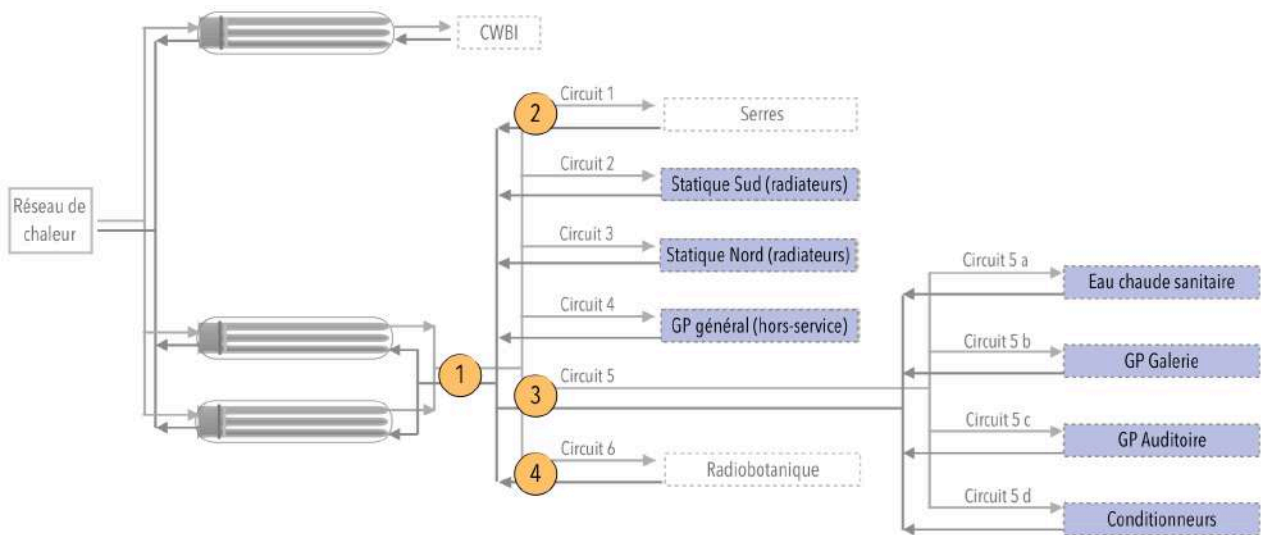


Figure 31 - Schéma du positionnement des compteurs de chaleur sur le circuit de chauffage

Le graphe de la Figure 32 reprend la consommation de chaleur après les interventions sur l'enveloppe et le système HVAC du bâtiment, il s'étend de mi-octobre 2018 au 17 juin 2019. On observe une consommation de chaleur plus élevée en période hivernale qu'en période estivale en lien avec les conditions climatiques. Un pic est présent en février, ce qui amène à penser que les températures étaient sans doute plus basses. Cependant, au vu du graphe de la Figure 33 reprenant la superposition de la consommation de chaleur et des températures, cette hypothèse est à rejeter.

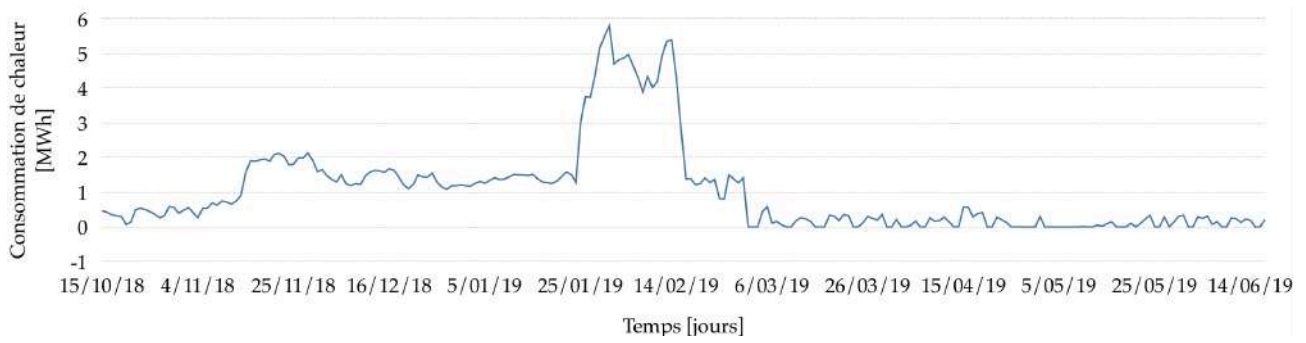


Figure 32 - Graphe de la consommation journalière de chaleur en fonction du temps

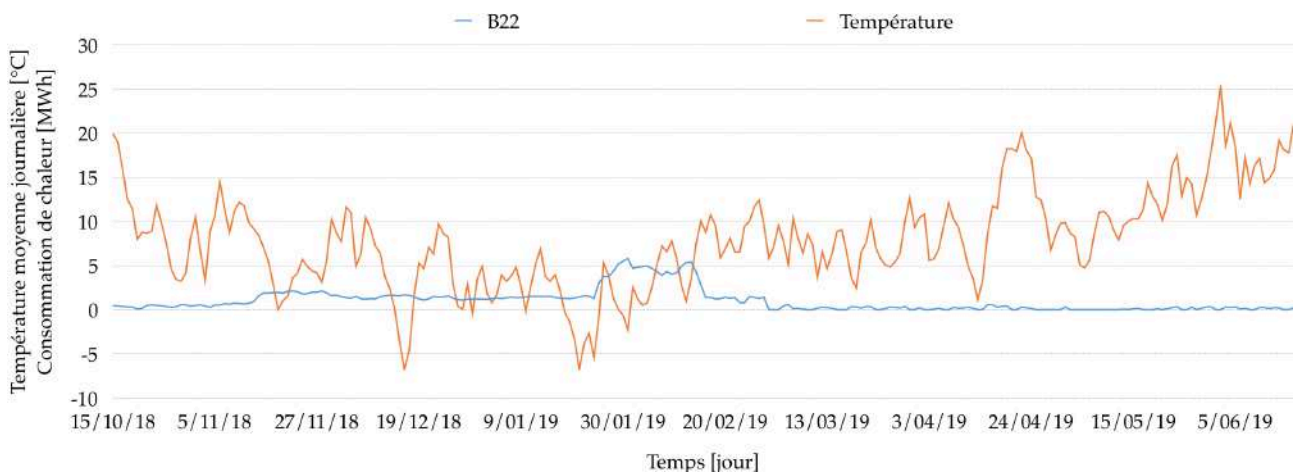


Figure 33 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur et de la température moyenne journalière en fonction du temps

De plus, le graphe de la Figure 34 reprenant la consommation de chaleur lue sur le compteur numéro 3 rassemblant les consommations dues à l'eau chaude sanitaire, aux deux groupes de pulsion galerie et auditoire et aux conditionneurs, montre que le pic n'est pas dû à cette consommation. Il en sort de cela que, d'une part cela pourrait être dû à la consommation de chaleur des circuits statiques nord et sud, donc des radiateurs, ou, tout simplement à une erreur de relevé ou de calcul.

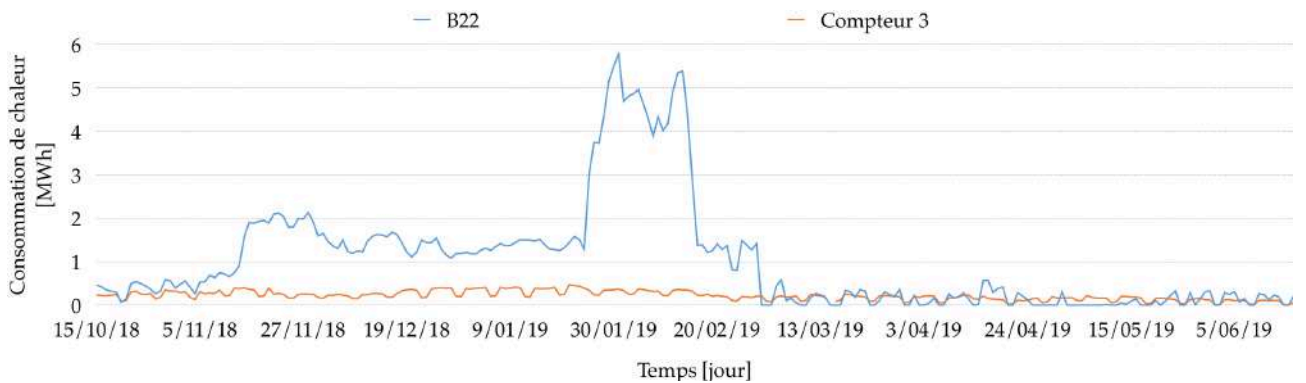


Figure 34 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur du B22 et de la consommation de chaleur lue sur le compteur 3 en fonction du temps

Pour ce qui est de la consommation de chaleur avant les travaux de rénovation, elle a été calculée sur base de l'équation de la droite identifiée par Kevin Sartor à la suite d'une étude des consommations de chaleur (Figure 35).

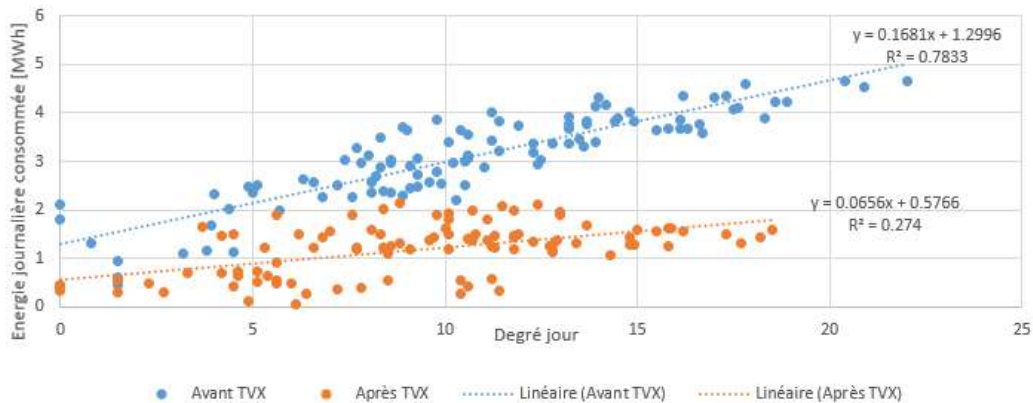


Figure 35 - Signatures énergétiques identifiées sur base des données de consommation de chaleur des années 2018 et 2019 (Kevin Sartor)

Sur base des données météorologiques, les degrés-jour ont pu être calculés. L'équation

$$y = 0,1681x + 1,2996$$

a permis de calculer la consommation journalière pour les années 2016 et 2017. Ces données sont représentées sur la Figure 36 qui reprend la consommation mensuelle de chaleur.

Au total, la consommation annuelle de chaleur calculée vaut 836,71 MWh pour l'année 2015, 916,57 MWh pour 2016 et 888,45 MWh pour 2017. Sachant que Cofeley facturait 1.670 MWh/an pour l'ensemble du complexe botanique, les résultats paraissent plausibles. Deux autres éléments permettent de valider ces valeurs. D'une part, lors de l'audit énergétique réalisé en 2015, Teen Consulting avait calculé une consommation totale de 890 MWh/an (Teen Consulting, 2015, p.47). De plus, François Randaxhe avait obtenu la valeur 804,29 MWh pour la consommation de l'année 2015, suite à la simulation du modèle qu'il avait réalisé dans SimAudit (François Randaxhe, 2016, p.33).

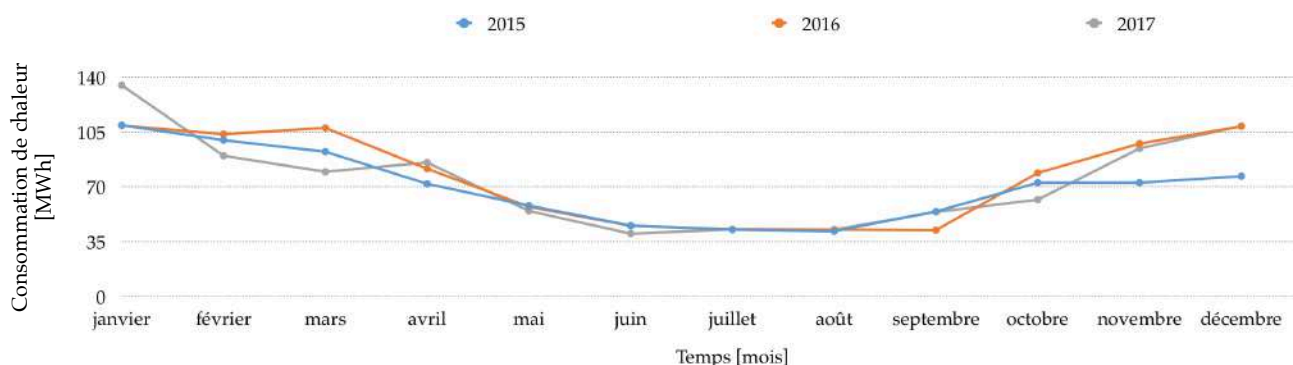


Figure 36 - Superposition des graphes de la consommation de chaleur mensuelle du B22 pour les années 2015 à 2017

L'équation de la droite représentant la consommation de chaleur après rénovation,

$$y = 0,0656x + 0,5766$$

appliquée aux années 2018 et 2019, donne comme résultat les courbes représentées à la Figure 37. On observe une parfaite superposition avec les consommations réelles pour les deux mois de l'année 2018, ce qui n'est pas le cas pour 2019.

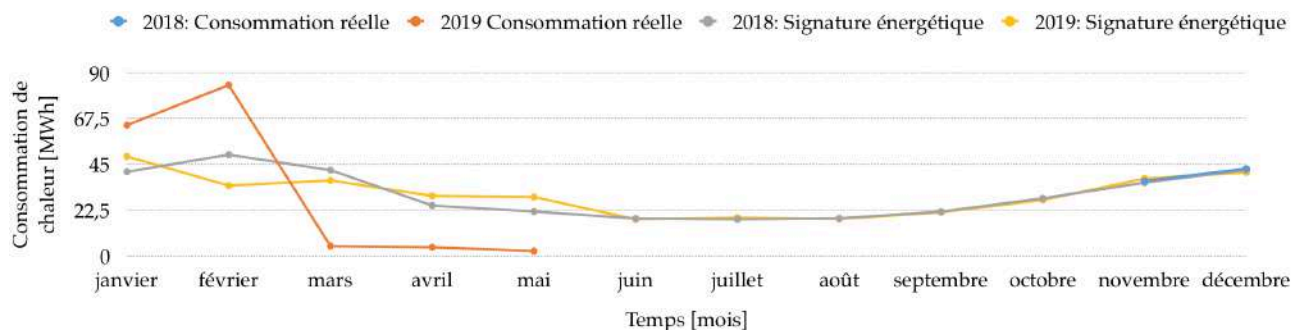


Figure 37 - Superposition des graphes de la consommation mensuelle de chaleur du B22 pour les années 2018 et 2019

7. ANALYSE DES DONNÉES CLIMATIQUES

7.1 DONNÉES CLIMATIQUES ACTUELLES

Les données climatiques utilisées pour la simulation des consommations ont été fournies par le Laboratoire de climatologie et topoclimatologie de l'Université de Liège. Les fichiers reprenaient des données journalières pour les années 2015 à 2019 compris. La température moyenne journalière à 2 m au-dessus du sol, la quantité de précipitation cumulée sur la journée, la moyenne journalière du rayonnement pour des longueurs d'ondes incidentes courtes, et la durée cumulée de l'ensoleillement y étaient reprises, et cela, sur le pixel le plus proche du Sart-Tilman. L'analyse de ces données constitue une part importante du travail au vu de l'influence des données climatiques sur les apports et les consommations du bâtiment. Le graphe de la Figure 38 reprend la température moyenne mensuelle pour les années 2015 à 2019. La tendance observée est similaire pour les 5 années. L'écart de température entre les différentes années est élevé pour le début de l'année et diminue avec le temps, il reste faible pour la fin de l'année. Partant du principe que les consommations énergétiques, et plus particulièrement de chaleur, sont fonction de la température extérieure, ces observations montrent l'importance de la comparaison des résultats de simulation du modèle sur base de mêmes données météorologiques.

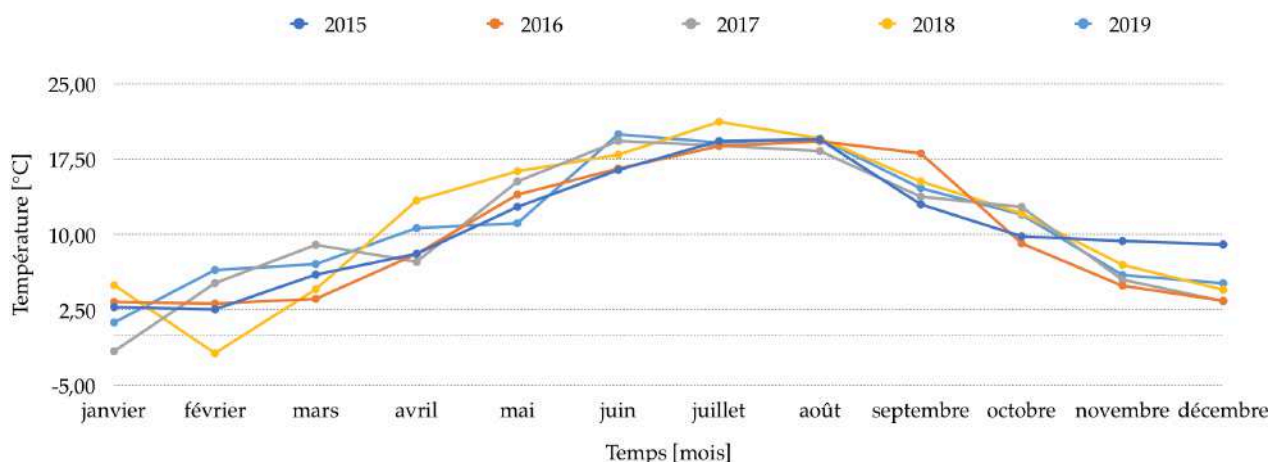


Figure 38 - Graphe de la température moyenne mensuelle à 2 m au-dessus du sol pour 2015 à 2019

Les apports solaires jouent un rôle important dans le bâtiment, le rayonnement a un impact sur les apports énergétiques. Le graphe de la Figure 39 montre l'évolution du rayonnement en fonction du temps pour les 5 années étudiées. L'écart du rayonnement entre les différentes années reste faible en période hivernale, et augmente en période estivale. On observe qu'en 2016, le rayonnement reste, dans la majorité du temps, plus faible comparé aux autres années.

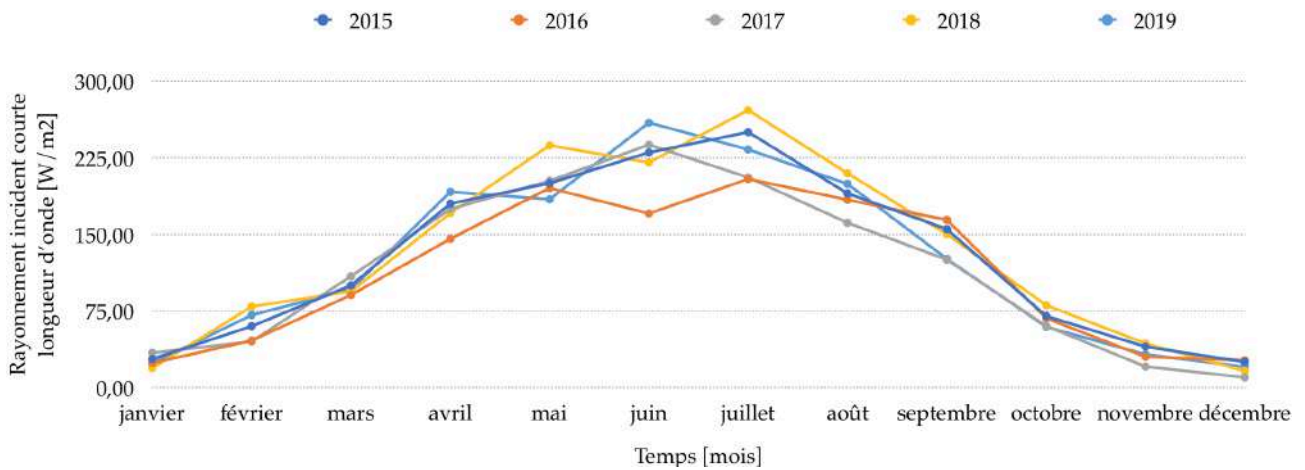


Figure 39 - Graphe du rayonnement incident pour 2015 à 2019

Ces données vont être utilisées dans les deux modèles de simulation. La rénovation ayant duré de mai 2017 à juillet 2018, les données climatiques avant mai 2017 seront utilisées dans le modèle avant rénovation (Modèle I), et les données après juillet 2018, seront utilisées dans le modèle après rénovation (Modèle II) (Figure 40).

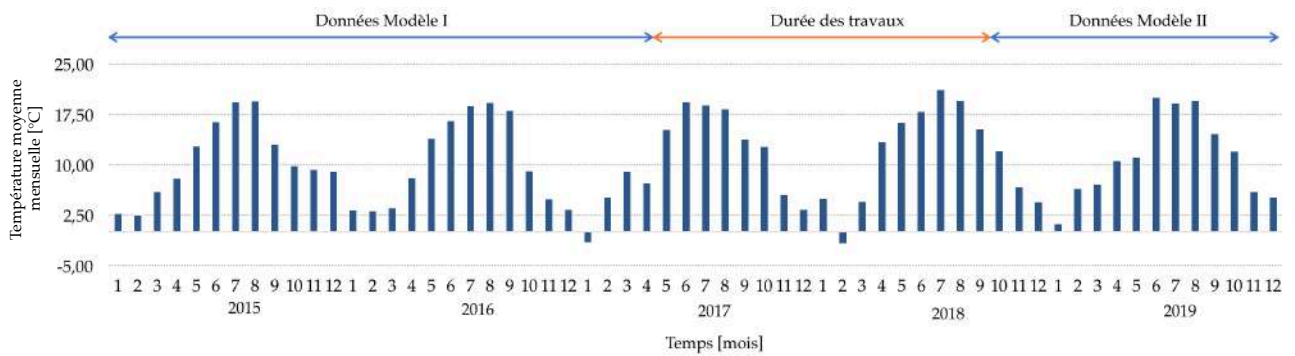


Figure 40 - Graphe de la température moyenne mensuelle pour 2015 à 2019

7.2 DONNÉES CLIMATIQUES FUTURES

Les fichiers météorologiques reprenant le futur scénario RCP 8.5 ont également été fournis par le Laboratoire de climatologie et topoclimatologie de l'Université de Liège. Deux fichiers du scénario RCP 8.5 simulés par le modèle MAR ont été fournis, le premier reprend les résultats de simulation du modèle forcé à ses frontières par le MCG (modèle de circulation général) MIROC5, et le second par le MCG NORESM-1-M. Le premier est un modèle norvégien, et le second, japonais. Ces deux modèles sont, selon Caroline Wyard, « les plus adaptés pour représenter la circulation atmosphérique générale et les conditions de surface moyennes actuelles sur l'Europe » (Wyard, 2019, p.28). Le modèle de circulation général permet, tout simplement, de prendre en compte, dans la simulation, la circulation atmosphérique et océanique. Comme il est possible de voir sur la Figure 41, reprenant les graphiques des résultats obtenus pour les deux modèles de simulation généraux différents, les résultats sont, à peu de chose près, similaires. Ces données seront introduites dans le modèle du bâtiment B22 après rénovation (Modèle II) réalisé dans DesignBuilder, pour mesurer l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment. Pour cela, c'est le modèle de MCG MIRO-5 qui sera retenu.

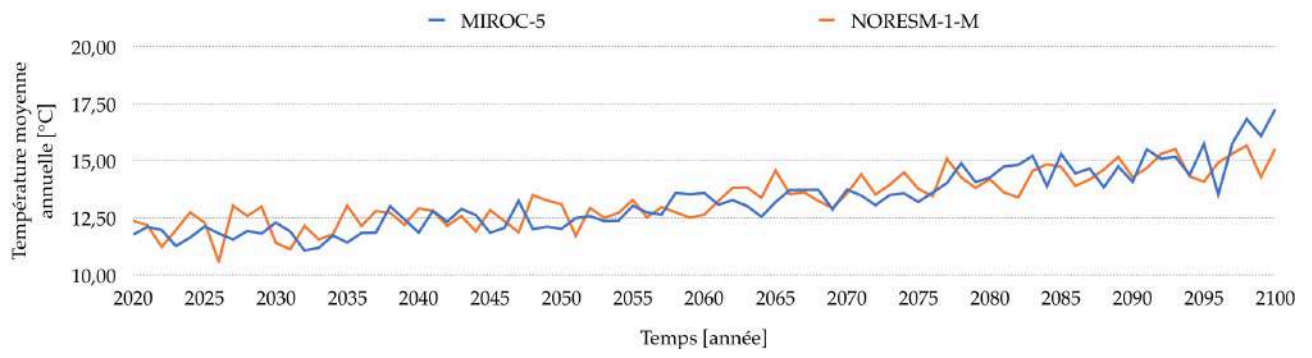


Figure 41 - Température moyenne annuelle pour la période 2020-2100

8. CRÉATION DES MODÈLES

Toutes ces informations acquises au moyen des études réalisées qui ont permis de caractériser les systèmes mis en place, les détails de l'enveloppe, ... sont utilisées dans la phase de la réalisation des modèles de référence numériques avant et après rénovation pour répondre à la question de recherche. Les modèles seront simulés dans EnergyPlus via l'interface DesignBuilders puis seront calibrés à l'aide des données collectées des consommations énergétiques du bâtiments avant et après intervention.

8.1 MODÈLE I

La modélisation commence par l'introduction, dans le logiciel, des données relatives au site telles que la localisation, l'orientation du bâtiment et les données météorologiques.

8.1.1 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

La modélisation a commencé par l'introduction des données météorologiques des années 2015 et 2016, ce fichier a été simulé par le modèle MAR. Ces données n'étant pas directement exploitables par le logiciel, une reconversion interne a dû être réalisée. Ensuite, le fichier a été attribué à un nouveau climat créé dans DesignBuilder.

8.1.2 GÉOMÉTRIE

La seconde étape consiste à modéliser la géométrie du B22. L'interface DesignBuilder a permis une modélisation aisée au vu de sa forme relativement simple, bien qu'elle ne soit pas adaptée aux bâtiments aux formes complexes.

Dans le but d'obtenir un modèle le plus précis possible, certaines parties du plan ont été retracées sur le logiciel AutoCAD, sur base des plans disponibles en .pdf, afin de pouvoir les exporter en fichier .dxf et importer dans DesignBuilder. Les plans de base reprenaient les grands traits tels que les murs extérieurs et le zonage pour chaque étage. Une fois ces bases importées, le modèle a été tracé niveau par niveau, ensuite les étages ont été superposés.

Pour toutes les parties dessinées en-dessous du niveau du sol, DesignBuilder associe les caractéristiques correspondantes. Dans le cas du B22, aux niveaux -2 et -1, uniquement une partie du bâtiment est enterrée. Afin de représenter cela au mieux, l'ensemble du bâtiment a été dessiné au dessus du niveau du sol, ensuite, les parties enterrées ont été représentées à l'aide de blocs, appelés composantes, aux propriétés similaires à celui d'un sol, venant enrober ces parties du bâtiment, comme illustré en vert à la Figure 42.

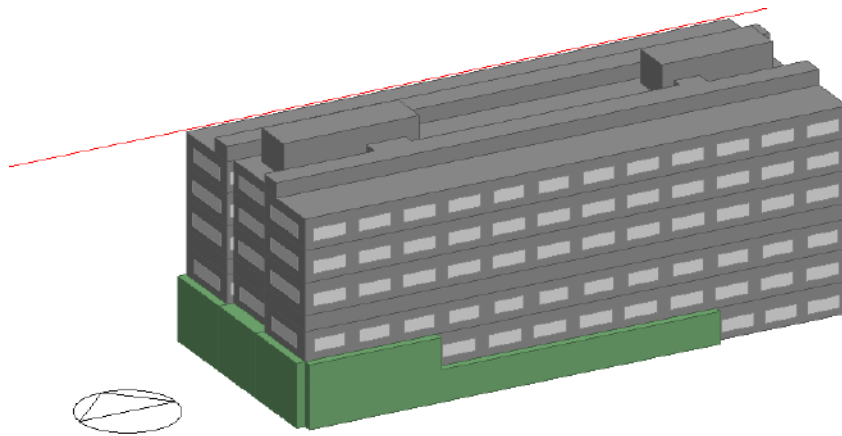


Figure 42 - Vue axonométrique du bâtiment dans DesignBuilder

Le bâtiment étant situé sur un site fortement arboré, il est important de tenir compte de la présence de la végétation aux alentours, qui va limiter les apports solaires, d'autant plus qu'une partie des arbres seront supprimés pendant l'intervention, ne faisant donc plus masque solaire pour le modèle après rénovation (Modèle II). Pour ce faire, la végétation sera modélisée par des blocs composantes comme il est possible de voir à la Figure 43, ceci va permettre de prendre en compte l'effet de l'ombre portée par cette végétation sur le bâtiment.

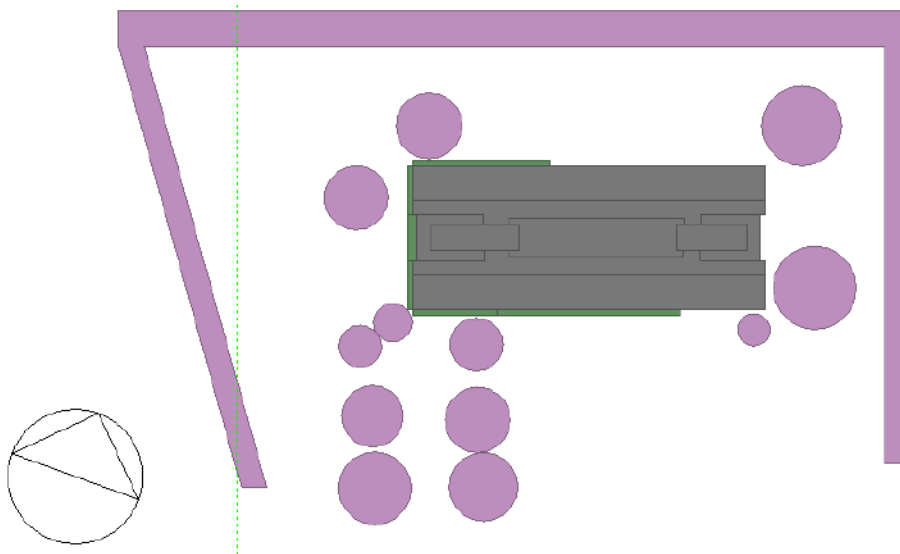


Figure 43 - Vue en plan du bâtiment et de la végétation aux alentours dans DesignBuilder

8.1.3 ZONAGE

Le modèle de simulation a été développé en considérant 50 typologies de zones thermiques. Le zonage du bâtiment s'est fait en fonction des différents critères tels que l'orientation, le type d'activité qui s'y déroule définissant les gains thermiques internes de la zone due à la présence d'équipements et d'occupants, la répartition du système HVAC, l'éclairage et d'autres paramètres. En résumé, tout ce qui a un impact sur les conditions thermiques de la zone. Dans le modèle, au total 31 zones thermiques ont été créées, reprises en détail dans l'Annexe 1. Il faut savoir que, même si certaines zones sont liées, comme par exemple la cage

d'escalier qui revient à chaque niveau, DesignBuilder considère une zone par étage, ce qui multiplie la zone 1 par 6. La licence ne permettant pas de dépasser les 50 zones, ceci explique le choix du nombre de zones.

Dans DesignBuilder, pour le zonage, le partitionnement standard a été utilisé, il permet de créer des espaces fermés en utilisant un mur de séparation comme limite physique.

Plus le nombre de zones est grand, plus la précision est élevée car le nombre d'hypothèses, telle que, par exemple, la considération d'une activité identique dans des espaces dédiés à une activité de bureau et des espaces dédiés à une activité de laboratoire, diminue. Cependant, dans les grands bâtiments, il est conseillé de minimiser le nombre de zones car un grand nombre de zones maximiserait le temps de simulation. Dans la littérature, des auteurs comme Bellia et al. (2018) ont mesuré l'impact de ce genre d'hypothèses sur des modèles, il en est sorti que certaines hypothèses peuvent être déterminantes sur les résultats fournis par la simulation. Ici, des hypothèses ont été prises dans certains cas pour conserver un temps de calcul relativement correct. Ces hypothèses conduiront, sans doute, à des erreurs au niveau des résultats, c'est là que le calibration du modèle, à l'aide de données de consommations réelles, prend tout son sens.

Une fois les zones créées, l'étape suivante consiste à définir, pour chacune d'elles, différents paramètres tels que l'activité, la construction, les ouvertures, l'éclairage et le système HVAC.

8.1.4 DONNÉES D'ENTRÉE ET HYPOTHÈSES

ACTIVITÉ

Dans cet onglet, les données relatives à l'utilisation de chacune des zones seront introduites, cela permet de déterminer la majorité des gains de chaleur internes du bâtiment ayant un impact sur les exigences de refroidissement et de chauffage.

Dans cette section, le type d'activité, la densité d'occupants, l'horaire d'occupation, les températures de consigne de chauffage et de refroidissement, les gains internes dus aux équipements et aux auxiliaires, et de nombreux autres paramètres sont encodés. Le tableau de l'Annexe 2 reprend l'ensemble des données qui ont été introduites dans l'onglet activité pour chaque zone.

La majorité des zones ont été considérées de type standard, ce qui signifie qu'elles sont occupées et chauffées et/ou refroidies. Les zones 3, 15 et 31 représentant, respectivement, la zone reprenant les techniques du niveau -2, le niveau technique entre les niveaux 0 et +1 ainsi que la toiture ont été évaluées comme étant des zones « semi-extérieures non conditionnées ». Ce sont des zones qui, par définition, sont inoccupées, non chauffées et non refroidies.

Au niveau du contrôle de l'ambiance, les consignes de température de chauffage ont été fixées à 21 °C pour les pièces situées au Nord, et 20°C pour les pièces situées au Sud. Pour les zones ne comportant pas de

régulateur permettant un contrôle d'ambiance, une température relativement basse a été introduite de manière à montrer l'absence de régulateur. Les simulations ont relevé que le contrôle de l'humidité, ainsi que les consignes de température pour climatisation n'ont aucun effet sur les résultats de consommation du bâtiment, les valeurs par défaut ont donc été laissées. Enfin, l'éclairage est fixé à 150, 175, ou 260 lux en fonction des différentes zones. Ces valeurs proviennent de l'audit réalisé par Teen Consulting en 2015, qui avait mesuré la luminosité dans trois locaux dédiés à différents types d'activités, et avait trouvé une intensité lumineuse moyenne de 150 lux dans les laboratoires, 175 lux dans la bibliothèque, et 260 lux dans les pièces pour herbiers.

En ce qui concerne leur occupation, les plans ont permis d'identifier la fonction de chacune des pièces du bâtiment. La densité d'occupation a été calculée à l'aide du cadastre des locaux reprenant le nombre d'occupants par local, pour certains espaces dont, notamment, les bureaux et les classes. Pour le reste, le nombre d'occupants/m² a été supposé sur base des activités qui s'y déroulent. DesignBuilder associe une valeur par défaut lors du choix de l'activité dans la case « Prédéfinition d'Activité ».

Pour ce type de bâtiment aux nombreuses salles, il n'est pas aisé de connaître l'horaire exact d'utilisation de chaque pièce. Pour son modèle réalisé sur SimAudit, François Randaxhe s'est basé, pour les données relatives à l'horaire d'occupation des pièces, sur les « mesures de puissances consommées sur le tableau électrique principal d'éclairage du bâtiment » (Randaxhe, 2016, p.25). Ainsi, pour la réalisation du modèle dans DesignBuilder, les données récupérées par François Randaxhe sur le compteur électrique ont été utilisées pour connaître l'horaire d'occupation du bâtiment. La Figure 44 représente le graphique d'occupation en fonction des heures pour une semaine type.

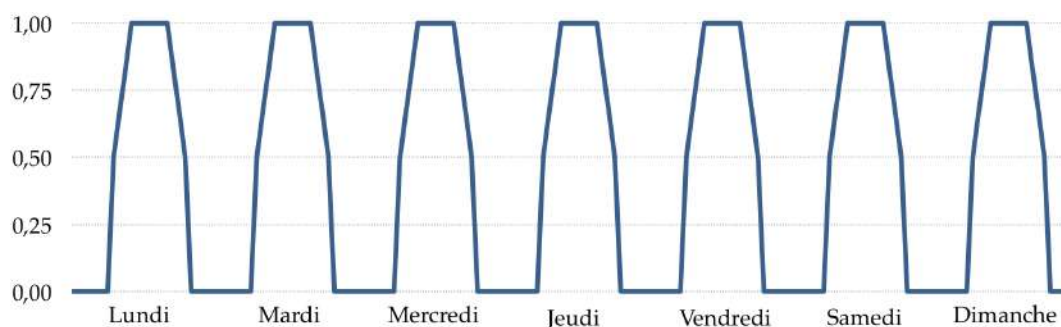


Figure 44 - Profil horaire de l'occupation du bâtiment

Pour chaque zone, les apports métaboliques, fixés par défaut par le logiciel, sont multipliés par un coefficient lié au planning, qui prend en compte le profil d'occupation permettant de simuler l'apport final dû à la présence d'occupants dans chacune des zones.

Les données du compteur électrique ont également été utilisées pour la création des plannings des équipements et des auxiliaires repris aux Figures 45 et 46. Le profil des équipements de bureau est fixé à 0,38 les week-ends. La densité de puissance a été fixée à 3,49 W/m² pour les équipements de bureautique avec une fraction radiante de 0,75, et à 5,46 W/m² pour les auxiliaires avec une fraction radiante de 0,5.

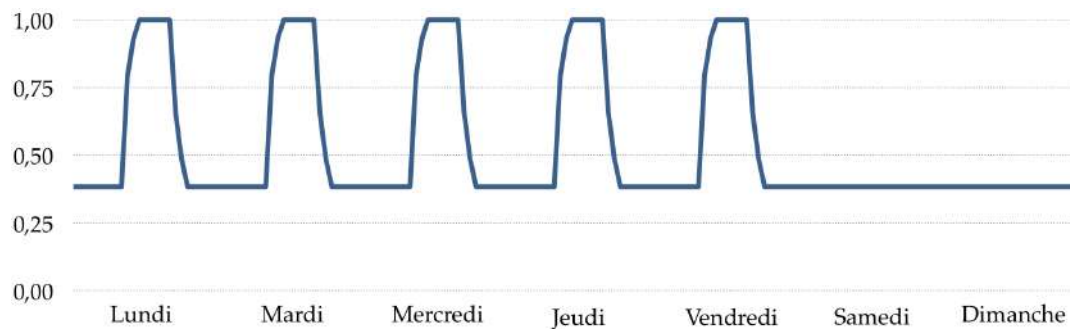


Figure 45 - Profil horaire des équipements de bureau

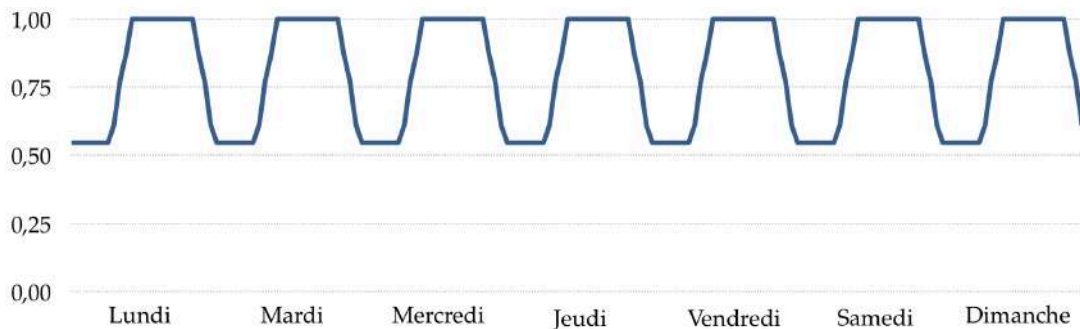


Figure 46 - Profil horaire des auxiliaires

Dans le bâtiment, il existe des chambres de culture et des chambres froides, les gains internes dus à ces éléments n'ont pas été modélisés telles qu'elles. Néanmoins, la consommation de ces chambres est incluse dans le modèle par l'utilisation des consommations électriques lues sur le tableau électrique de la sous-station, ce tableau reprend aussi la consommation d'électricité due à la présence du compresseur d'air. Pour les zones 7, 17 et 19, une puissance additionnelle a été encodée dans l'onglet divers. Le profil horaire de ce poste est illustré par la Figure 47. Une densité de puissance de 72 W/m^2 est considérée.

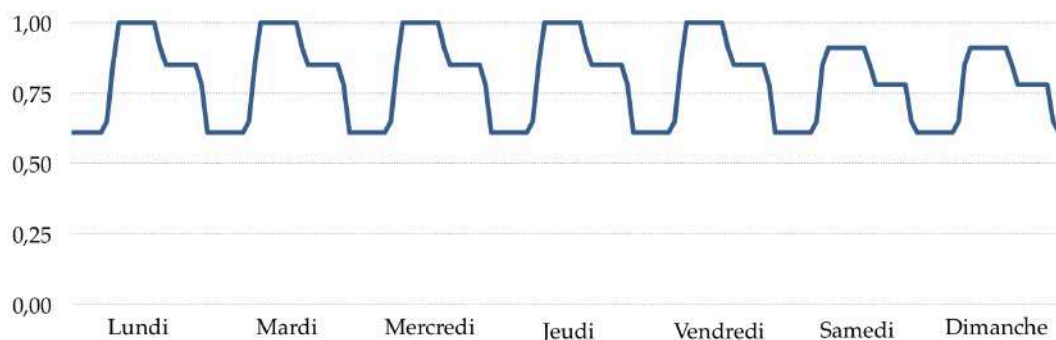


Figure 47 - Profil horaire du système de refroidissement

Dans les bâtiments destinés à l'enseignement, il est important de prendre en compte les congés scolaires. Ils sont considérés au niveau du bâtiment, contrairement aux autres paramètres qui sont encodés au niveau de chaque zone, pour optimiser la précision. Cela permet d'inclure l'effet des périodes sans occupation dans la simulation.

CONSTRUCTION

C'est dans cette section que sont spécifiées les propriétés de l'enveloppe du bâtiment ainsi que des parois intérieures. Les compositions et épaisseurs des éléments constituant les parois sont complétées à l'aide des informations disponibles sur les plans détaillés plus tôt dans la section 6.3.1. L'Annexe 3 reprend la composition des parois à chaque niveau. Le logiciel calcule automatiquement le coefficient de transmission thermique U pour chacune des parois.

L'étanchéité à l'air est également spécifiée dans cet onglet, le taux d'infiltration a été fixé à 0,5 vol/h. Cette valeur, relativement élevée, peut être justifiée par les conclusions réalisées par le bureau TeenConsulting qui relevait, dans son audit, le manque d'isolation du bâtiment et la faible étanchéité à l'air des châssis en aluminium. De plus, une thermographie effectuée en 2007, montre l'existence de ponts thermiques favorisant les fuites d'air.

OUVERTURES

Dans cette section les ouvertures sont paramétrées. Cette étape, réalisée au niveau des blocs (étages), est relativement aisée au vu de la régularité des dimensions des ouvertures. Pour le type de vitrage, un double vitrage est créé, constitué de deux vitres d'une épaisseur de 2,5 mm séparées par une lame d'air de 4 mm, la valeur de transmission thermique vaut alors, 2,86 W/m²K. Pour les châssis, de l'aluminium a été sélectionné comme matériau. Ensuite, pour chaque étage, ont été spécifiées la largeur et la hauteur des fenêtres, la hauteur d'allège, la trame de création des fenêtres et la distance entre le vitrage et le bord extérieur du mur. Les ouvertures sur les façades Ouest et Est, ayant des dimensions différentes de celles sur les deux autres façades, ont été modélisées par la création de sous-surfaces.

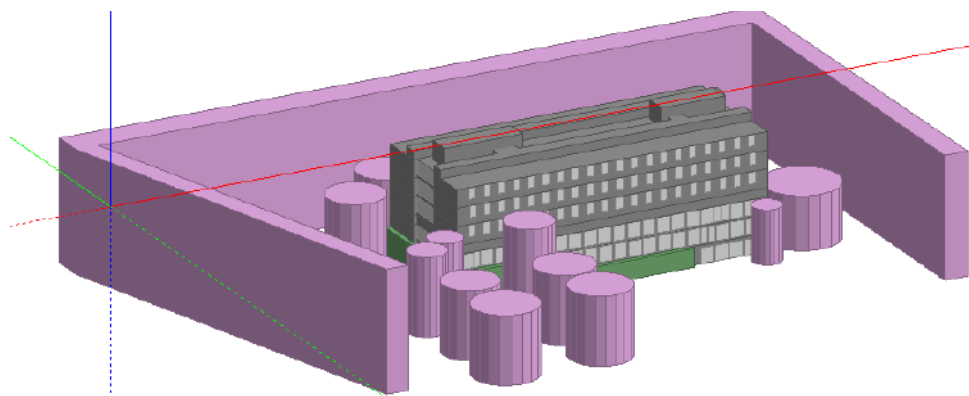


Figure 48 - Vue axonométrique des ouvertures dans Design Builder

ECLAIRAGE

Les données encodées dans cette section sont reprises dans le tableau de l'Annexe 4 pour chaque zone. De la même manière que pour l'éclairage dans l'onglet Activité les données ont été, ici aussi, reprises de l'audit de

Teen Consulting. Le Tableau 3 reprend l'ensemble des valeurs mesurées par le bureau dans trois différentes zones du bâtiment (Teen Consulting, 2015, p.35).

Local	Type de lampe	Puissance installée [W]	Puissance par unité de surface [W/m ²]	Intensité lumineuse moyenne [lux]	Densité de puissance normalisée [W/m ² .100lux]
Bibliothèque	T8 36W	810	6,14	175	3,5
Laboratoire	T8 36W	540	11,74	150	7,8
Herbier	T8 18W	2 565	13	260	5,01

Tableau 3 - Données éclairage (Teen Consulting, 2015)

De la même manière que pour les profils horaires d'occupation et des équipements de bureautique, un profil horaire a été déterminé pour l'éclairage, ce profil est illustré à la Figure 49.

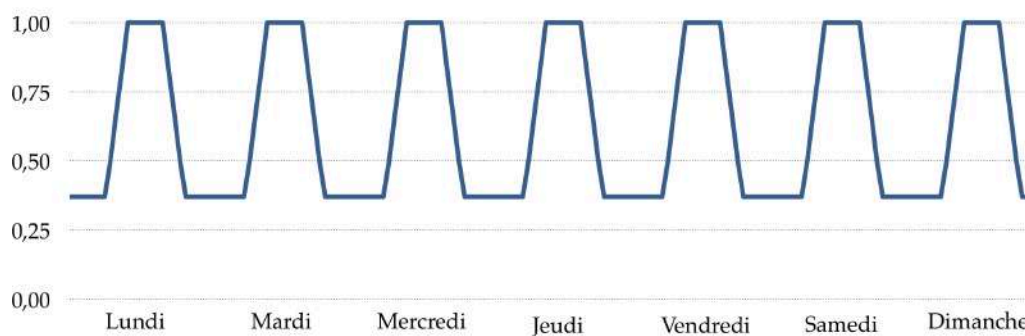


Figure 49 - Profil horaire de l'éclairage

SYSTÈME HVAC

Les systèmes de ventilation, de chauffage, de refroidissement et d'eau chaude sanitaire sont définis dans cet onglet. Le tableau de l'Annexe 5 reprend l'ensemble des données encodées pour le système HVAC.

Le système de ventilation est constitué de plusieurs groupes de pulsion, seul le groupe amenant l'air dans l'auditoire (zone 13) est en fonctionnement avec un horaire allant de 7h45 à 17h durant la semaine. Pour ce groupe, un débit de 2 304 m³/h est considéré. Le débit d'air neuf par personne, tel que renseigné dans la norme EN 13779 à propos de la ventilation des bâtiments non résidentiels, est de 8 l/s.personne pour une qualité de l'air modérée, ce qui équivaut à 28,8 m³/h.personne (EnergiePlus, 2020). L'amphithéâtre pouvant contenir un maximum de 80 personnes, le débit d'air vaut au total 2 304 m³/h. L'extraction de l'air se fait par 48 extracteurs répartis dans tout le bâtiment. Ces extracteurs ont été répartis de manière équitable dans le bâtiment, en prenant en compte que certaines zones ne possèdent pas d'extracteurs, ces données sont reprises dans le tableau de l'Annexe 5. Le groupe d'extraction général fonctionne de 8h à 17h. Le débit d'air extrait par extracteur a été estimé à 600 m³/h (François Randaxhe, 2016). Le rendement des groupes est supposé à 70%.

Le système de refroidissement produit de l'eau froide pour les chambres froides du bâtiment (zones 7, 17 et 19), la consommation d'énergie due à ce système a été encodée dans l'onglet Activité, comme expliqué précédemment.

Trois circuits différents alimentent le bâtiment en eau chaude : le circuit Nord, le circuit Sud, et le circuit de l'eau chaude sanitaire, du groupe de pulsion de l'amphithéâtre et de conditionnement. La puissance des pompes associées aux deux premiers circuits vaut 480 W, ce circuit fonctionne de 8h à 17h en semaine. Pour ce qui est du troisième circuit, il fonctionne en permanence et la puissance de la pompe vaut 635 W.

Le système de production d'eau chaude a été encodé à l'échelle du bâtiment comme étant un système semi instantané.

8.1.5 CALIBRATION DU MODÈLE

Les premiers résultats de simulation montrent des consommations de chaleur relativement différentes des réelles consommations du bâtiment. Le graphique de la Figure 50 montre la superposition de trois polygones, chacune représentant une manière différente d'obtenir la consommation de chaleur pour l'année 2015. La première représente les valeurs obtenues par le logiciel SimAudit à la suite de l'étude réalisée par François Randaxhe, la seconde reprend les résultats générés par DesignBuilder et la dernière, les résultats obtenus en appliquant la formule de la droite qui lie la consommation de chaleur aux degrés-jours, identifiée par Kevin Sartor sur base de réelles mesures de consommation.

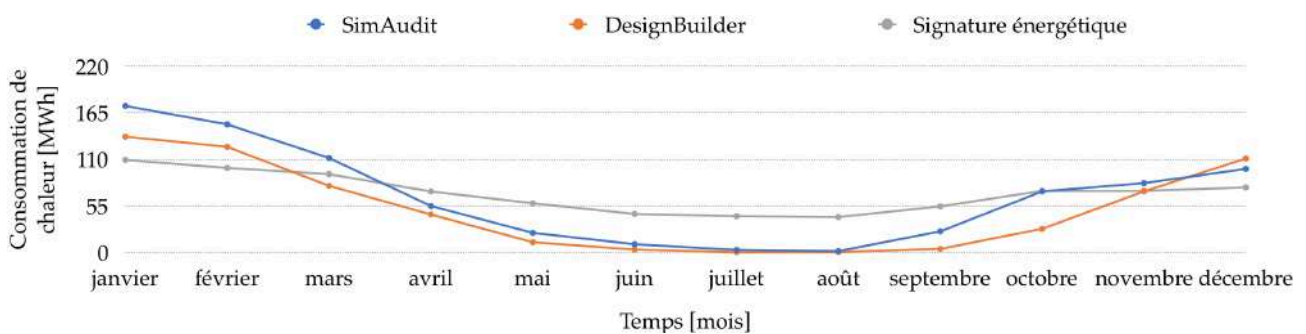


Figure 50 - Graphes de la consommation de chaleur mensuelle pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle non calibré)

La Figure 51 reprend la consommation annuelle pour l'année 2015 calculée de trois manières différentes. Comparée à la consommation annuelle obtenue à l'aide de SimAudit, il existe une erreur de 23,6% et 26,53% comparée à la consommation obtenue par la formule de la droite. Ces erreurs sont relativement élevées. Il convient donc de calibrer le modèle.

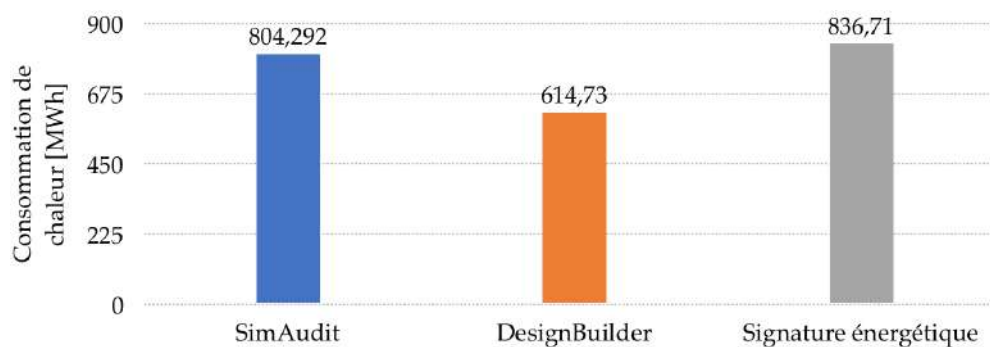


Figure 51 - Consommation annuelle de chaleur selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle non calibré)

Ces divergences sont certainement dues aux simplifications amenées au modèle mais aussi aux hypothèses. Par exemple, pour certaines salles comme la bibliothèque ou encore les laboratoires, ne connaissant pas le nombre exact d'occupants, le logiciel propose une valeur qui pourrait être loin de la réalité. Ainsi, pour obtenir des résultats plus proches de la réalité, certains paramètres ont été modifiés, le choix s'est tout naturellement porté sur ceux dont le degré de certitude était relativement faible. Les paramètres qui ont été laissés à la valeur par défaut, comme l'exemple donné précédemment, ou encore le coefficient de performance des installations ont été modifiés. De plus, c'est à ce moment que la décision de la modélisation de la végétation autour du bâtiment a été prise de la même manière que pour la prise en compte, dans la consommation, de l'effet des utilisateurs sur le bâtiment. Une ventilation naturelle a été introduite dans le bâtiment pour la période allant de mi-mai à mi-septembre, prenant en compte l'interaction des utilisateurs avec le bâtiment, et particulièrement les ouvertures vers l'extérieur.

Après un certain nombre d'itérations et la modification de quelques paramètres, l'erreur a considérablement diminué comme il est possible de voir sur la Figure 52. L'erreur entre la consommation obtenue par DesignBuilder et celle obtenue par SimAudit est de 0,4%, elle vaut 3,5%, en comparaison avec le résultat calculé à l'aide de la signature thermique.

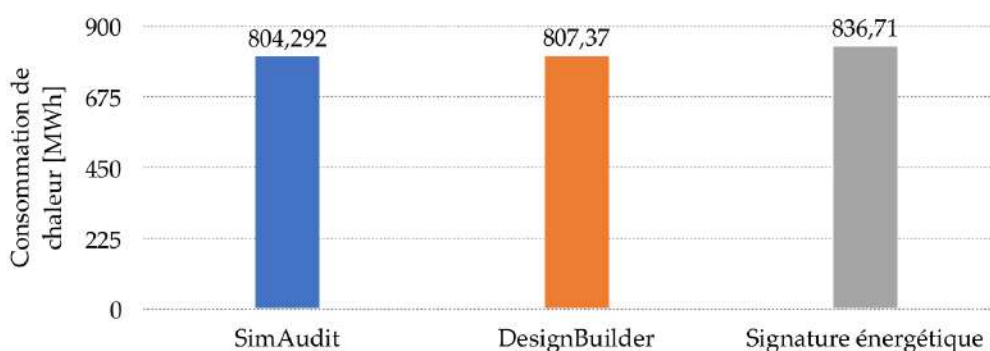


Figure 52 - Consommation annuelle de chaleur selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle calibré)

En ce qui concerne la comparaison des consommations mensuelles, celles-ci sont représentées sur la Figure 53. Les courbes de consommation obtenues par SimAudit et DesignBuilder s'épousent presque parfaitement,

en particulier pour la période estivale. L'écart qui existe lors des premiers mois pourrait être dû à la représentation de la végétation dans DesignBuilder, masquant ainsi les apports solaires, élément qui a été négligé lors de création du modèle dans SimAudit. La même conclusion ne peut pas être apportée, à la suite de la comparaison avec les résultats obtenus par le calcul en fonction des degrés-jours, ce qui est logique étant donné que ces résultats donnent une idée de la consommation, mais ne représentent pas parfaitement la réalité. Il est d'ailleurs possible de voir, en observant la Figure 35, que les données de consommation relevées sont dispersées autour de la droite et ne sont pas parfaitement alignées. De plus, les données de consommation qui ont permis de trouver l'équation de cette droite ne reprennent peut-être pas des données de consommation sur toute l'année.

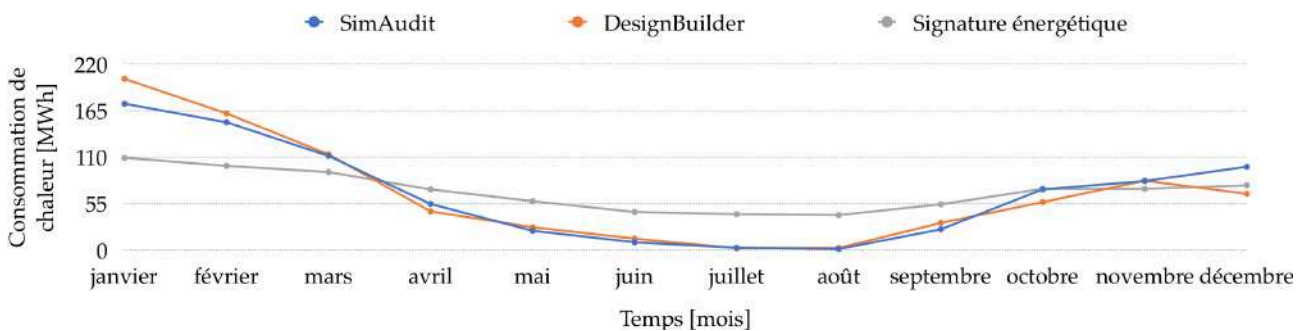


Figure 53 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle calibré)

La simulation a également été lancée pour l'année 2016 sur DesignBuilder, la Figure 54 reprend la superposition des deux graphes de consommation mensuelle. Cette fois, en comparant les consommations annuelles, l'erreur est de 0,7%, ce qui reste relativement faible.

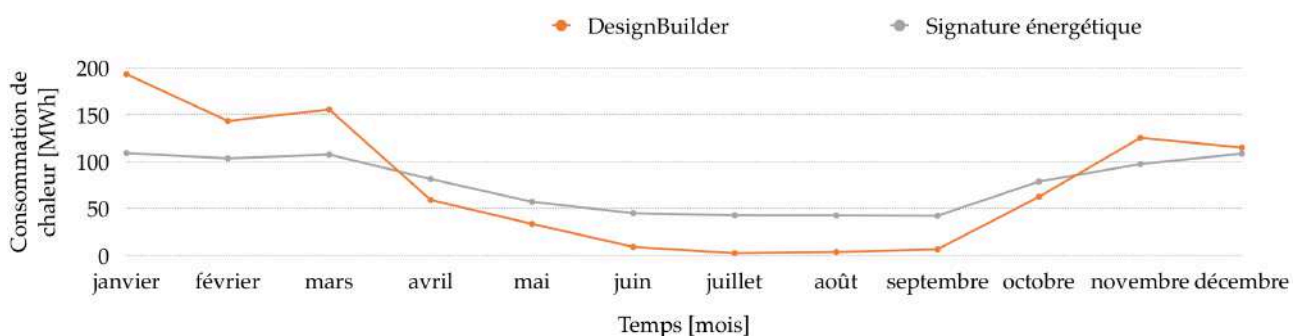


Figure 54 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2016 selon trois types de calculs (modèle calibré)

De la même manière que pour les consommations de chaleur, des écarts existaient entre la consommation électrique obtenue par DesignBuilder et les « réelles » consommations d'électricité. Le modèle a donc été calibré grâce aux profils de consommation énergétique à disposition. En faisant varier la densité de puissance encodée dans les onglets Activité et Eclairage il a été possible d'obtenir des résultats proches de la réalité.

Le modèle a été validé grâce à trois types d'informations. La première consistait en une validation à l'échelle horaire. Les données simulées par DesignBuilder sont comparées avec des réelles données mesurées toutes les minutes sur différentes armoires électriques, en 2016. Une grande corrélation est observée entre les résultats simulés et les mesures réelles. Les graphes des Figures 57 à 59 reprennent, dans l'ordre, les résultats de simulation horaire de la consommation d'électricité due à l'éclairage, au système de refroidissement, de ventilation et de distribution d'eau chaude, et enfin aux équipements et chambres climatiques pour la période allant du 20 avril au 10 mai. A titre de comparaison, les graphes des relevés réels issus du rapport de François Randaxhe se trouvent à l'Annexe 6.

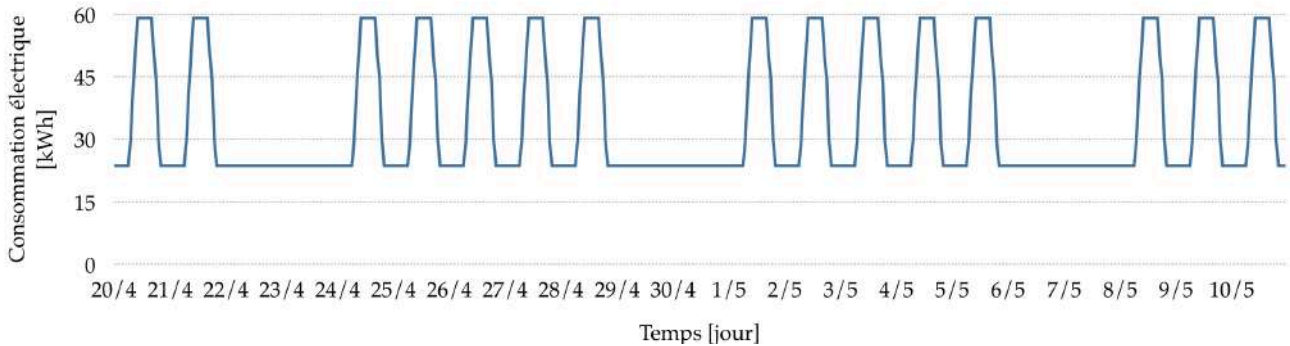


Figure 55 - Profil horaire de la consommation d'électricité par l'éclairage pour l'année 2015

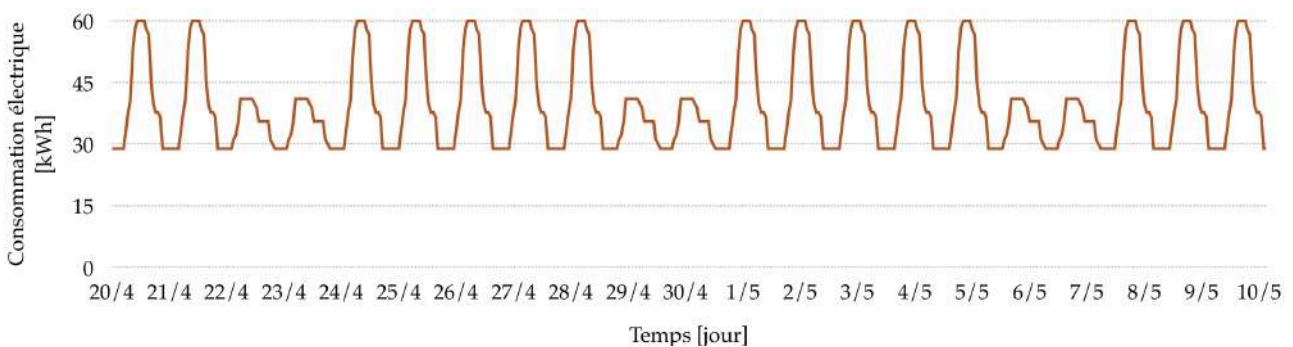


Figure 56 - Profil horaire de la consommation d'électricité par le système de refroidissement, de ventilation et de distribution d'eau chaude pour l'année 2015

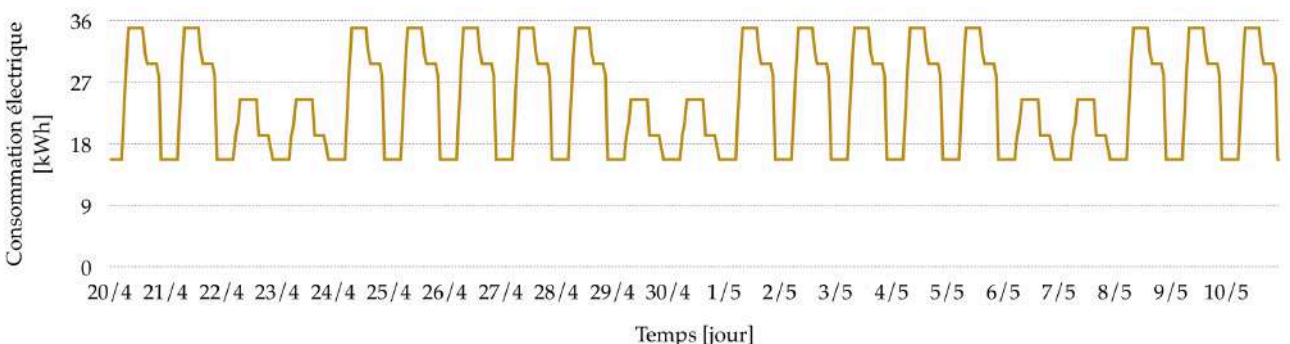


Figure 57 - Profil horaire de la consommation d'électricité par les équipements et chambres climatiques pour l'année 2015

La seconde validation a été effectuée en comparaison avec des données de consommations électriques mensuelles. Comme illustré à la Figure 56, les trois courbes suivent presque parfaitement la même tendance. La consommation lue sur le compteur général (SATEC), reprenant l'ensemble du complexe du B22, est également représentée, il en découle de ces calculs que la consommation séparée du B22 équivaut à, plus ou moins, 39% de la consommation lue sur le compteur.

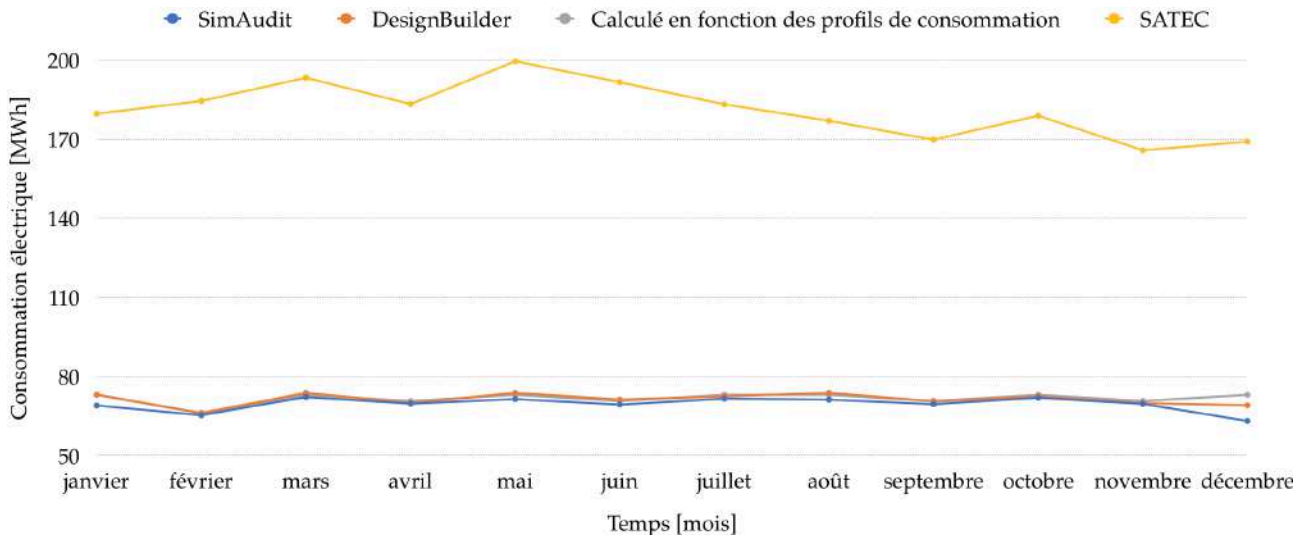


Figure 58 - Graphes de la consommation mensuelle d'électricité pour l'année 2015 selon trois types de calculs (modèle calibré)

Et enfin une troisième validation, cette fois-ci avec les données annuelles a été réalisée. Sur base des profils théoriques obtenus par François Randaxhe à la suite de la récolte de données de consommation toutes les minutes, sur certaines armoires tel qu'expliqué dans la section 6.5.1, il a été possible de calculer une consommation annuelle théorique. La Figure 55 montre la différence de la consommation annuelle obtenue par les trois différents moyens de calcul. Une erreur de 2,67% est observable en comparaison avec les résultats de SimAudit. Cette erreur est plus faible lorsque les résultats sont comparés avec les résultats obtenus en calculant en fonction des profils de puissance, elle vaut alors 0,44%.

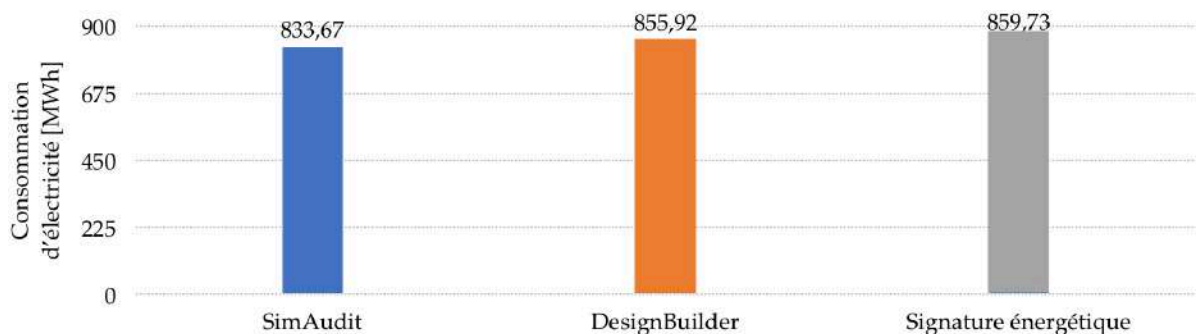


Figure 59 - Consommation annuelle d'électricité selon trois types de calculs, pour l'année 2015 (modèle calibré)

8.2 MODÈLE II

Pour ce second modèle représentant le modèle du bâtiment après rénovation, un certain nombre de paramètres ont été modifiés sur base du cahier spécial des charges, partie techniques spéciales et partie architecture, et des données de la section 6.4 reprenant les travaux de rénovation qui ont été réalisés. La géométrie du bâtiment, le zonage ainsi que les données encodées dans l'onglet Activité sont restés inchangés. La création de ce modèle a été réalisé sur base du Modele I.

8.2.1 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

De la même manière que pour le premier modèle, un fichier reprenant les données météorologiques généré à l'aide du modèle MAR, cette fois-ci pour les années 2018 et 2019, a été introduit dans le modèle.

8.2.2 GÉOMÉTRIE

Une partie de la végétation étant enlevée dans la zone autour du bâtiment lors de la rénovation, cette végétation a également été retirée dans le modèle. Cette étape est importante étant donné que la suppression de la végétation augmente les apports solaires dans le bâtiment. Le plan d'implantation de la Figure 60, fourni par l'Administration des Ressources Immobilières, reprend en rose l'ensemble des arbres qui ont été enlevés à la suite des travaux.

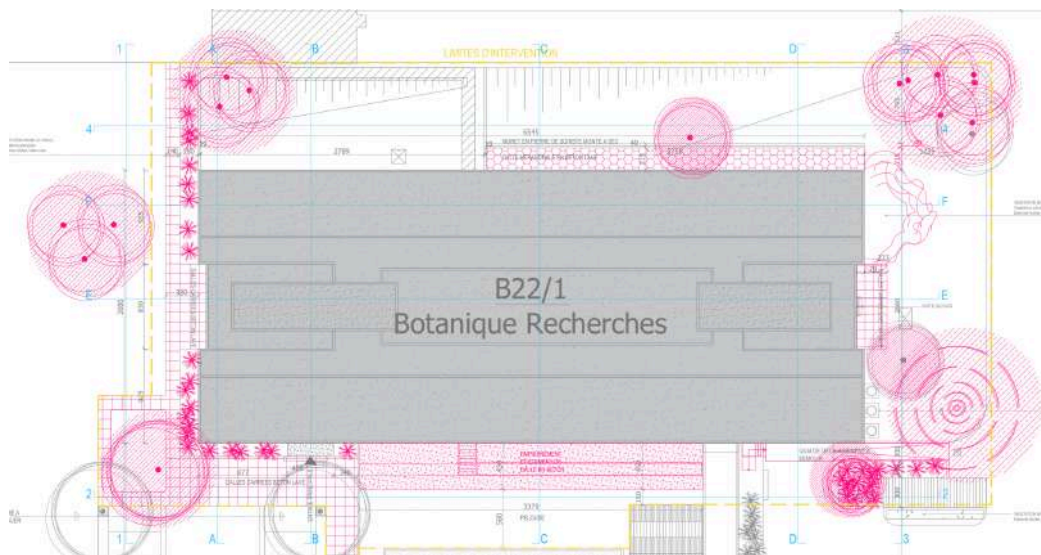


Figure 60 - Plan d'implantation du bâtiment B22 (Administration des Ressources Immobilières, 2016)

8.2.3 DONNÉES D'ENTRÉE ET HYPOTHÈSES

CONSTRUCTION

L'enveloppe du bâtiment a été modifiée avec les données de la section 6.4.1. Les partitions internes des zones sont restées inchangées. L'étanchéité à l'air étant améliorée, le taux d'infiltration de l'air peut être fixé à 0,25 vol/h.

OUVERTURES

Dans cette section, le matériau utilisé pour les châssis a été remplacé par de l'aluminium anodisé. Les vitres ont été remplacées par un triple vitrage. Deux types de vitrages ont été utilisés en fonction de l'orientation de l'ouverture. Sur la façade orientée au sud, un vitrage à contrôle solaire a été utilisé. Le Tableau 4 reprend les caractéristiques de ces vitrages.

	Vitrage Sud	Vitrage Nord
Composition	Vitre (6mm) - Argon (15mm) - Vitre (4mm) - Argon (15mm) - Vitre (6mm)	Vitre (6mm) - Argon (15mm) - Vitre (4mm) - Argon (15mm) - Vitre (6mm)
Transmission lumineuse (T_L)	54 %	73 %
Réflexion lumineuse (R_{Le})	15 %	14 %
Facteur solaire (g)	0,26	0,53
Coefficient de transmission thermique	0,5 W/m ² K	0,6 W/m ² K

Tableau 4 - Caractéristiques des vitrages

Des protections solaires motorisées ont été placées sur les ouvertures, elles sont composées de lamelles en aluminium inclinées de 45°. Une commande solaire permet de fermer automatiquement les stores lorsqu'un niveau d'éclairage préalablement fixé est atteint.

ECLAIRAGE

Les bureaux, laboratoires, salles de cours ainsi que l'auditoire ont été munis de lampes de type T5 de 28 W, le hall, les locaux techniques et les cages d'escaliers de lampes de type T5 de 35 W, et les couloirs de circulation de tubes à led de 24 W. Dans un document réalisé par Jacques Fryns en 2013, le nombre de lampes est détaillé par étage et par zone. Ce document a permis de se rendre compte du nombre de lampes dans chacun des modules (nord, sud ou central). Ces valeurs, ont permis de calculer la puissance installée dans chaque zone. L'ensemble des valeurs par zones est repris dans l'Annexe 7. Le profil horaire d'éclairage est resté inchangé.

SYSTÈME HVAC

Comme expliqué dans la section 6.4.3, les groupes de pulsion et certains groupes d'extraction ont été remplacés, le Tableau 5 reprend l'ensemble des nouveaux groupes et certaines caractéristiques. Les données encodées dans le logiciel ont été calculées sur base de ce tableau pour chaque zone. Le rendement de la batterie de récupérateur de chaleur du groupe d'extraction a été fixé à 80%. Dans cette section, les récupérateurs de chaleur ont également été modélisés sur les extracteurs.

	Groupes de pulsion			Groupe d'extraction
	Général	Galerie	Auditoire	Général
Débit d'air pulsé [m ³ /h]	50 000	6 000	1 800	/
Débit d'air extrait [m ³ /h]	/	/	1 800	2 x 10 000

Tableau 5 - Caractéristiques des groupes de traitement d'air

L'Annexe 8 reprend l'ensemble des données encodées dans l'onglet HVAC de DesignBuilder.

Pour ce qui est du chauffage, les radiateurs dans les locaux allant de 0/4 à 0/11 au niveau 0 ont été remplacés par des convecteurs de chauffe de 500 W.

Dans le cas du modèle après rénovation, aucune mesure n'est disponible au niveau des compteurs électriques, comme pour le premier modèle. C'est pourquoi, l'encodage de la puissance électrique consommée par le système de ventilation sera introduit dans le champ « Energie auxiliaire » dans l'onglet HVAC. Ainsi, comme il est possible de lire dans le cahier spécial des charges, la classe énergétique choisie pour le groupe de ventilation est le SFP3, selon la norme NB EN 13 779, cette classe correspond à une puissance électrique se situant entre 750 W et 1250 W par m³/s. Connaissant le débit d'air pulsé ou extrait et les superficies de chaque zone, il est possible de trouver l'énergie totale consommée par zone pour la ventilation. Le détail des calculs se trouve à l'Annexe 8.

PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

Les panneaux photovoltaïques ont également été modélisés de manière à pouvoir simuler les apports réels d'énergies en fonction de l'ensoleillement. Les panneaux sont représentés à l'aide de l'outil « dessiner collecteurs cellules » intégré dans DesignBuilder par un bloc dont la surface correspond à la surface totale de l'ensemble des panneaux, c'est à dire 148,8 m².

8.2.4 CALIBRATION DU MODÈLE

De la même manière que le premier modèle, le modèle après rénovation a également été calibré afin d'obtenir un modèle qui serait le reflet des consommations réelles. Ainsi, après quelques itérations, les courbes de consommation de chaleur mensuelle, simulée par DesignBuilder et mesurée aux compteurs, se

croisent pour les mois de janvier, mars, avril et mai pour l'année 2019 (Figure 61). Il semblerait y avoir une grande divergence pour le mois de février, comme démontré dans la section 6.5.2, cette consommation relevée aux compteurs reste inexplicable, l'hypothèse d'une erreur de mesure a été retenue. Les mois de novembre et de décembre ont été vérifiés par rapport aux mesures rapportées de l'année 2018 (Figure 62). Il a été impossible de vérifier les données pour les mois allant de juin à octobre, étant donné que les consommations mesurées aux compteurs n'étaient pas disponibles. Cependant, au vu des tendances de la courbe de consommation mesurée pour les autres mois, les valeurs simulées semblent cohérentes.

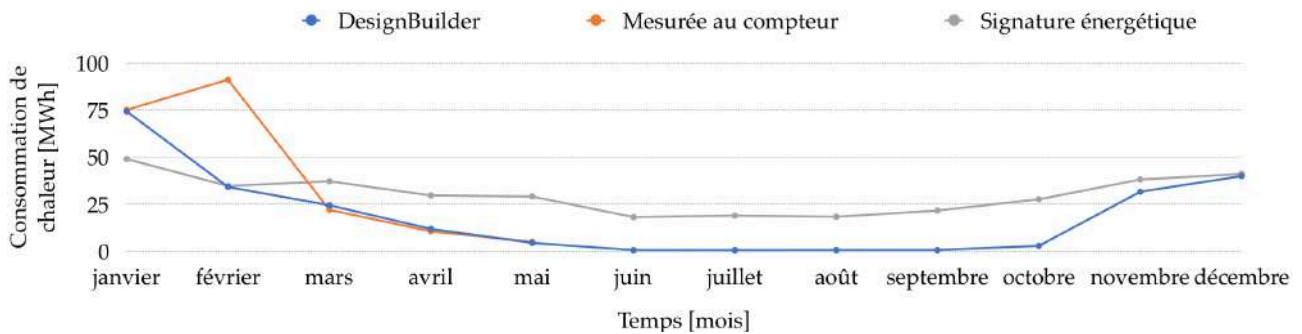


Figure 61 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2019 selon trois types de mesures (modèle calibré)

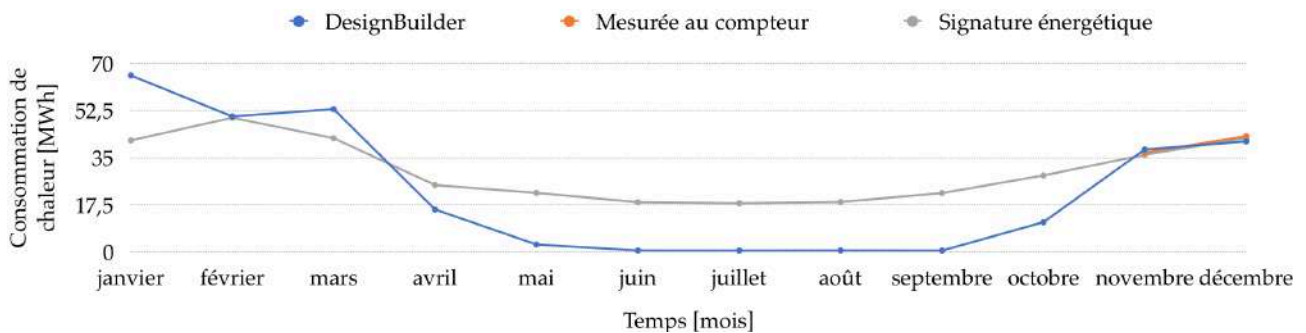


Figure 62 - Graphes de la consommation mensuelle de chaleur pour l'année 2018 selon trois types de mesures (modèle calibré)

Sur ces figures, il est également possible d'observer que les données de consommation simulées par DesignBuilder, et celles calculées par la formule liant la consommation aux degrés-jours, correspondent uniquement pour les deux derniers mois de l'année. Cela permet de conclure que cette formule a probablement été définie à l'aide des mesures de consommation relevées au compteur pour les mois de novembre et de décembre de l'année 2018, ce qui pourrait éventuellement expliquer le fait que, pour le reste du temps, il n'y ait pas de correspondance entre ces valeurs et les valeurs de consommation réelles, ou encore celles simulées par DesignBuilder.

Pour ce qui est de la consommation d'électricité, comme expliqué plus tôt, les mesures de consommation reprennent la consommation d'électricité de l'ensemble du complexe botanique. Il n'existe pas de mesures reprenant la consommation du bâtiment B22 seul, après la rénovation. Il est cependant possible, avec une certaine marge d'erreur, de considérer que la partie du complexe botanique ne reprenant pas le B22

consomme approximativement 1 315 MWh/an (valeur obtenue en soustrayant la consommation annuelle du B22 seul simulé par DesignBuilder à la consommation mesurée au SATEC pour l'année 2015), et que cette consommation est constante dans le temps. En soustrayant cette valeur de la consommation mesurée au SATEC pour l'année 2019 (1 967 MWh), une valeur proche de celle simulée par DesignBuilder est obtenue comme le montre la Figure 63. Bien évidemment, ceci, ne permet pas de calibrer le modèle mais de constater que la valeur de consommation annuelle, simulée par DesignBuilder, est plausible.

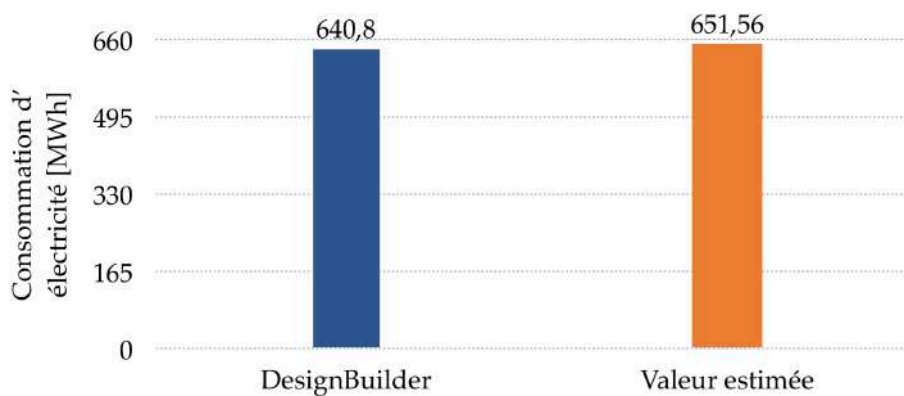


Figure 63 - Consommation annuelle d'électricité selon deux types de calculs, pour l'année 2019

9. ANALYSE DES RÉSULTATS

Les modèles avant et après rénovation étant calibrés, il est désormais possible de les comparer. Les données climatiques ayant un impact sur la consommation de chaleur, il est important que les simulations réalisées sur les deux modèles soient réalisées pour la même année, de manière à les rendre comparables. Le choix s'est porté sur l'année 2019, les résultats qui suivent correspondent donc aux résultats simulés pour cette année.

Les objectifs d'une rénovation énergétique sont simples : les économies d'énergie, la diminution de l'impact du bâtiment sur l'environnement, et l'augmentation du confort des utilisateurs, en particulier pour les bâtiments d'enseignement. La comparaison des résultats de simulation est donc étudiée au travers de ces trois thématiques.

9.1 CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

L'économie d'énergie constitue l'objectif premier d'une rénovation énergétique.

9.1.1 CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ

L'évolution de la consommation d'électricité mensuelle est constante dans le temps, comme le montre la Figure 64. Par rapport à la situation avant rénovation, la consommation d'électricité a baissé de 25,13%, elle est passée de 855,92 MWh/an à 640,8 MWh/an.

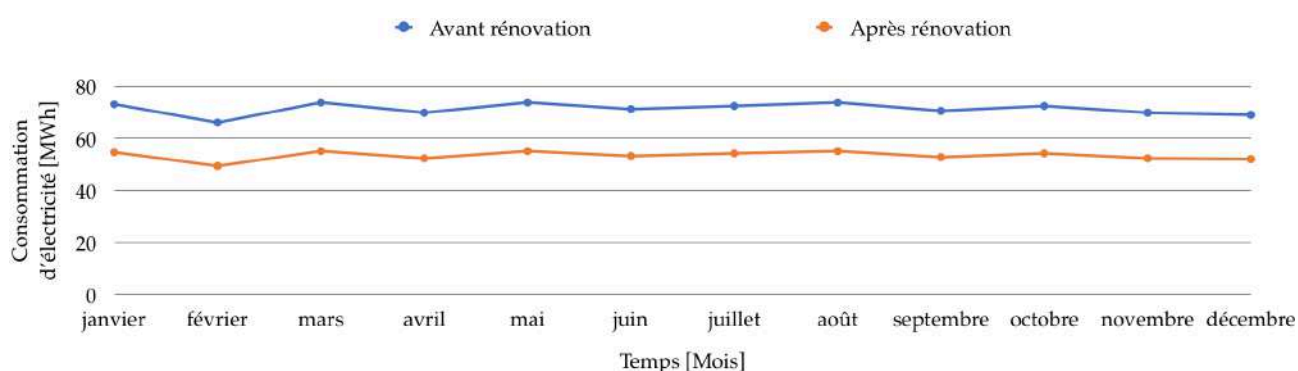


Figure 64 - Consommation mensuelle d'électricité pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019

La Figure 65 reprend la distribution des consommations d'électricité en fonction de l'utilisation. Avant la rénovation, l'éclairage était le plus grand consommateur d'énergie; actuellement, grâce aux travaux, il est le poste qui consomme le moins d'électricité dans le bâtiment. Rappelons que les auxiliaires reprennent les consommations du système de refroidissement, de la résistance électrique des groupes de pulsion et de la pompe de distribution de l'eau chaude.

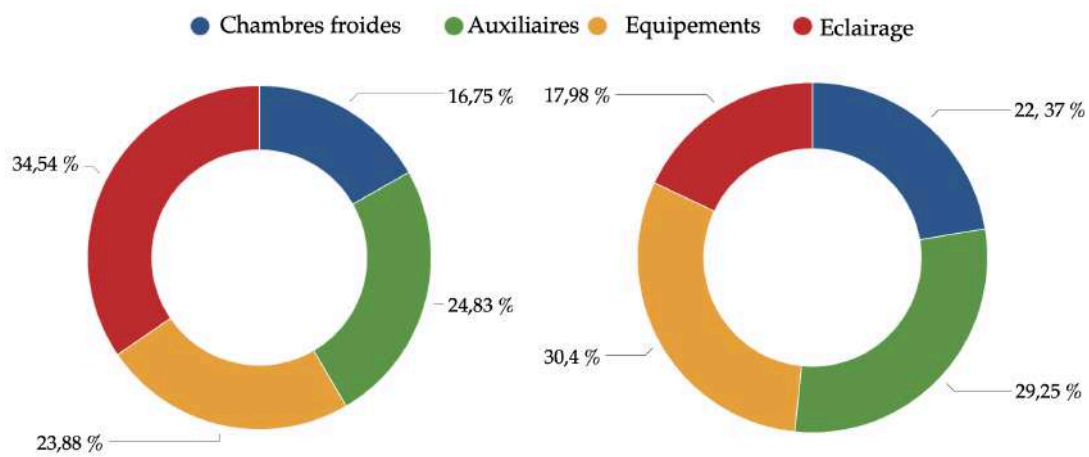


Figure 65 - Distribution de la consommation d'électricité par poste, pour les modèles avant (à gauche) et après (à droite) rénovation, pour l'année 2019

La diminution de la consommation d'énergie due aux différents postes est reprise à la Figure 66. L'éclairage est le poste qui a le plus diminué, une diminution de près de 56,62 % est observée.

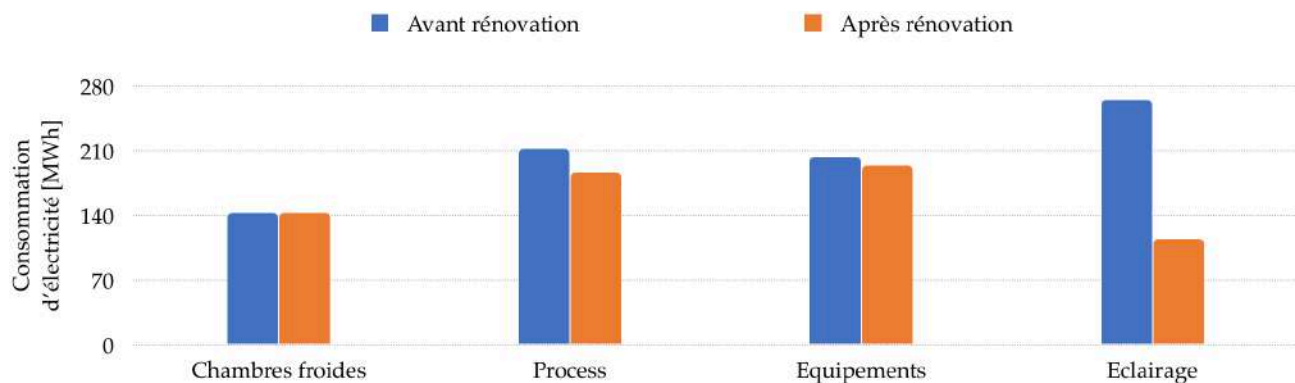


Figure 66 - Consommation d'électricité annuelle par poste pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019

9.1.2 CONSOMMATION DE CHALEUR

Les résultats indiquent qu'après la rénovation du bâtiment, la demande de chaud a diminué considérablement (Figure 67). Cette amélioration a permis de réduire les besoins en énergie primaire pour le chauffage du bâtiment de 70,3% par an, ce qui n'est pas négligeable du point de vue financier, notamment, dans ce type de bâtiments. Ce résultat montre l'importance de la rénovation de l'enveloppe sur des bâtiments de grande envergure. Une amélioration de l'enveloppe permet de réaliser à la fois d'importantes économies énergétiques, mais aussi économiques.

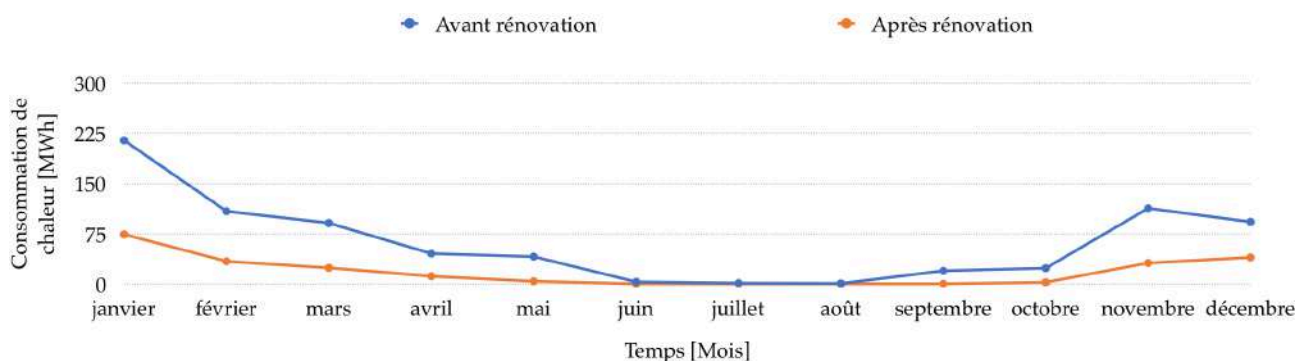


Figure 67 - Consommation mensuelle de chaleur pour les modèles avant et après rénovation, pour l'année 2019

9.1.3 ENVELOPPE DU BÂTIMENT

La rénovation du bâtiment ayant été axée sur l'enveloppe, il est intéressant de quantifier la qualité des parois. Sur le diagramme de la Figure 68, on observe que la plus grande partie des déperditions thermiques se faisaient au travers des murs. Après la rénovation, ces déperditions ont considérablement diminué, notamment pour les parois verticales.

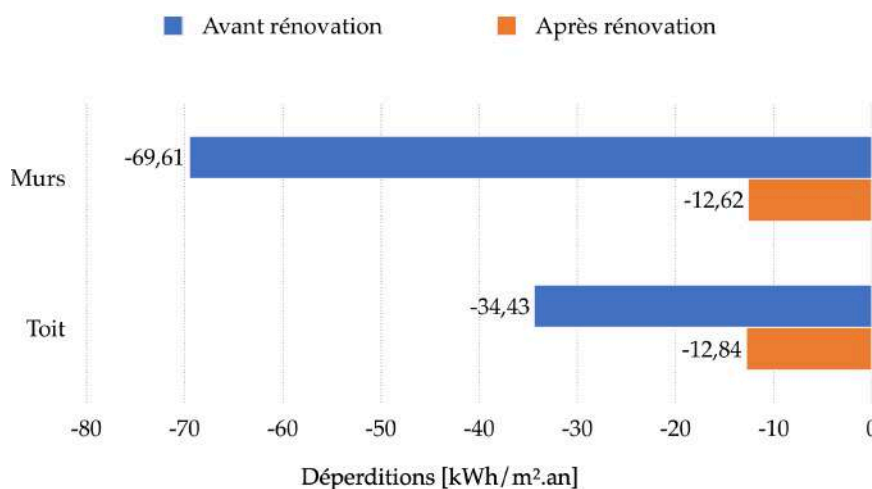


Figure 68 - Déperditions au travers de l'enveloppe pour les modèles avant et après rénovation

9.2 RENTABILITÉ DE LA RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE

La phase de recherche et d'étude, pour les travaux de rénovation énergétique, ayant été financée par EEEF, une diminution de la consommation d'énergie de minimum 20% a été exigée suite à sa participation à la politique 20/20/20 de l'UE. Comme le montre la Figure 69, cette exigence est respectée. La consommation d'électricité a diminué de 25,13% et la consommation de chaleur de 70,28%.

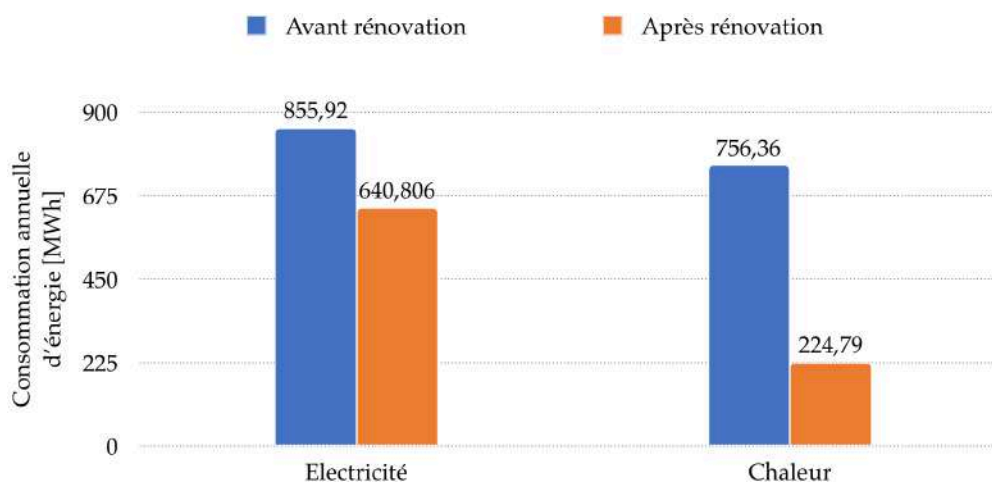


Figure 69 - Consommation d'énergie pour les modèles avant et après rénovation

Pour ce qui est de l'économie financière, sachant que l'ensemble des rénovations a, à peu près, coûté 4.850.000 €, et partant du principe que l'Université de Liège a opté pour un formule tarifaire variable auprès du fournisseur Engie pour le gaz et l'électricité, le temps de retour est de 35,5 années grâce aux économies d'énergie, étant donné que environ 136 937 € sont économisés par an. Pour ce calcul de nombreuses hypothèses ont été prises comme par exemple, la consommation, uniquement, de gaz pour le chauffage. A savoir que, en réalité, la chaleur est produite par une cogénération biomasse et trois chaudières bi-combustibles (mazout et gaz). L'utilisation des paramètres d'indexation de l'année 2019, fait également partie des hypothèses. En effet, ce paramètre variant avec le temps, il est impossible de prévoir les valeurs dans l'avenir. Le détail des calculs se trouve à l'Annexe 9. Comme il est possible de voir dans ce détail, de nombreux facteurs interviennent dans le calcul du prix final, le résultat obtenu permet donc de donner une idée du temps de retour et ne représente en rien une valeur exacte. Afin d'obtenir une valeur à l'image de la réalité plus d'informations seraient nécessaires, des informations confidentielles que seul le client peut obtenir auprès du fournisseur.

De plus, sur base des prédictions du Bureau fédéral du Plan (2020), une augmentation de l'indice santé serait observée dans les années à venir. Ceci étant un facteur influençant l'indexation, cet élément amènerait à une diminution du temps de retour de l'argent investi dans les travaux.

Une part de l'électricité (181,46 MWh/an) étant produite par les panneaux photovoltaïques, cette part d'énergie renouvelable, qui correspond à 28,32% de la consommation annuelle, a été retirée de la consommation finale.

La Figure 70 reprend la variation du coût total dû à la consommation d'électricité et de chaleur. Ce graphe prend également en compte le fait qu'une part de l'électricité est produite par les panneaux, cette part n'est donc pas comptabilisée dans le prix.

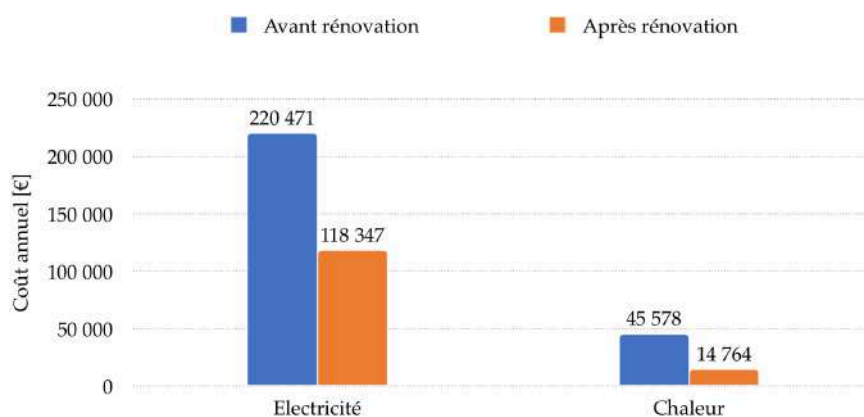


Figure 70 - Coût annuel de la consommation d'énergie pour les modèles avant et après rénovation

De plus, l'objectif de la rénovation, tel qu'énoncé sur le site de l'Université de Liège (2014) de « *réduire de minimum 20% les consommations énergétiques des bâtiments visés : -11,2% pour la consommation électrique et -49,7% de combustibles pour le chauffage* » est largement respecté dans le cas du B22.

9.3 IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'une des causes du réchauffement climatique réside dans l'émission de gaz à effet de serre. Pour rappel, le secteur du bâtiment est responsable de 19% des émissions dans la Région Wallonne. (climat.be, s.d.) Les émissions de dioxyde de carbone étant fonction de la consommation d'énergie primaire, il est possible d'estimer les émissions du bâtiment. Le site EnergiePlus (2007) renseigne différentes valeurs d'émission de CO₂ en fonction du type de combustible. Ainsi, partant du principe que l'électricité produit 0,29 kg CO₂/kWh et la combinaison de gaz naturel et de mazout, 0,232 kg CO₂/kWh, les émissions de CO₂ ont chuté de 70,28 % dû à la diminution de consommation de gaz et mazout, et de 25,13 % grâce à la diminution de la consommation d'électricité, comme illustré à la Figure 71. De plus, une partie de l'électricité est produite par les panneaux photovoltaïques, elle vaut 181,46 MWh/an pour l'année 2019, ce qui correspond à 28,32 % de l'électricité consommée. Il est évident que cette valeur sera différente chaque année en fonction des conditions météorologiques. La prise en compte de cet élément montre que les émissions de CO₂, dues à la production d'électricité, chutent de 46 % par rapport à la situation du bâtiment avant rénovation.

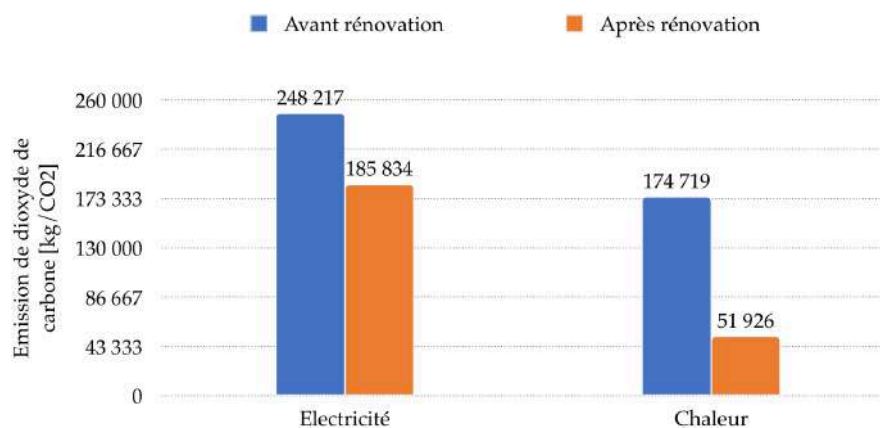


Figure 71 - Emission de CO₂ en fonction du type de combustible pour les modèles avant et après rénovation

9.4 CONFORT INTÉRIEUR

Enfin, le dernier objectif, mais pas des moindres, d'une rénovation est le confort des espaces intérieurs notamment pour les bâtiments d'enseignement qui sont supposés assurer une qualité de l'air intérieur élevée pour la productivité et la santé des occupants. Ainsi, le modèle dynamique a permis d'évaluer l'effet de la rénovation sur les conditions de confort sur base de deux indicateurs : le taux de CO₂ de l'air permettant de quantifier la qualité de l'air intérieur, et l'indice PPD de confort thermique.

9.4.1 QUALITÉ DE L'AIR

La mesure de la concentration de dioxyde de carbone a été réalisée pour quatre journées types, choisies à des saisons différentes, les résultats de simulation ont montré que le taux était plus élevé en été qu'en hiver. La Figure 72 reprend le profil de la variation du taux de CO₂ pour les 4 jours simulés pour le modèle avant et le modèle après rénovation. Une diminution du taux de CO₂ est observée, la rénovation du bâtiment, et plus particulièrement du système de ventilation, a donc permis d'améliorer la qualité de l'air intérieur de ce point de vue. Il faut savoir que la norme NBN EN 13779 relative à la ventilation des bâtiments non résidentiels, renseigne une classification de la qualité de l'air en fonction de la concentration de dioxyde de carbone dans l'air. Quatre niveaux sont proposés, ils sont représentés sur la Figure 72 et permettent ainsi de situer le niveau de CO₂ présent dans l'air par rapport aux niveaux renseignés par la norme (EnergiePlus, 2007). Les résultats montrent que le taux est tout naturellement plus élevé en période d'occupation. Pendant la période d'occupation du bâtiment, la qualité de l'air est moyenne pour le bâtiment après rénovation; elle était considérée comme modérée avant les travaux. La diminution de la concentration du dioxyde de carbone tourne autour des 100 ppm/h.

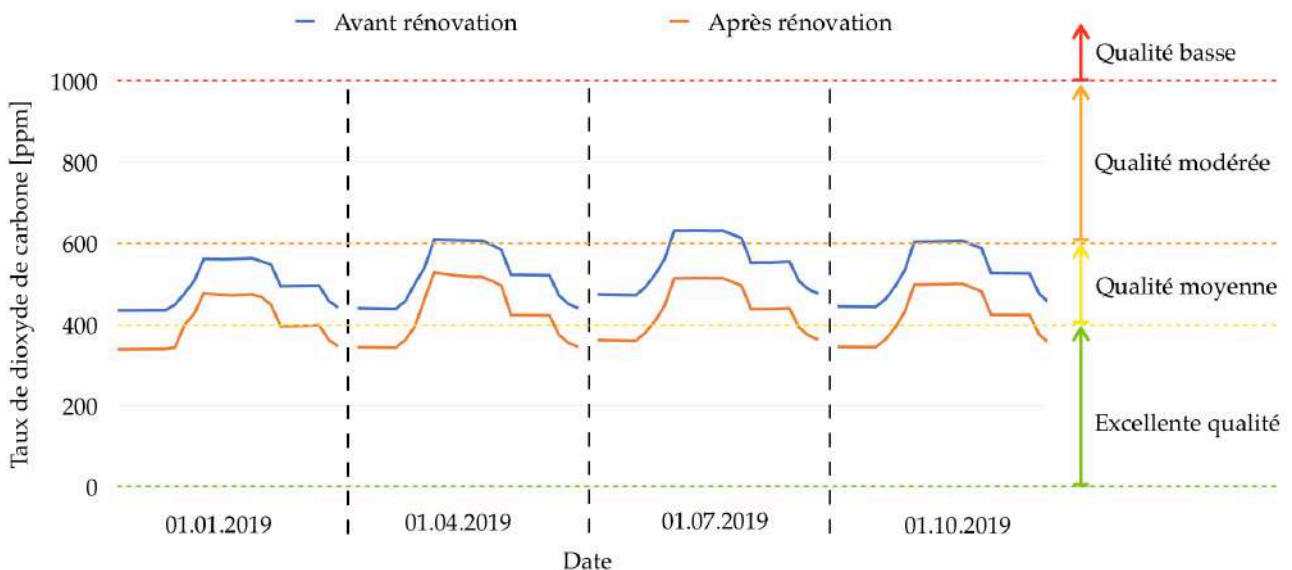


Figure 72 - Profil horaire du taux de CO₂ pour quatre jours répartis sur l'année 2019

Il pourrait être intéressant de positionner des capteurs dans les locaux pour comparer les réelles mesures avec les résultats de simulation.

9.4.2 CONFORT THERMIQUE

Le confort thermique est mesuré au moyen de l'indicateur thermique PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits) qui se calcule sur base du PMV (indice de vote moyen prévisible). Ce dernier est considéré comme étant l'avis d'un nombre important de personnes, qui qualifieraient la sensation de confort suivant cette échelle : le zéro correspond à une sensation de confort idéal; en dessous, la température est inférieure à la température idéale et, inversement, une valeur au-dessus de zéro signifie que la température est supérieure à la température souhaitée. (EnergiePlus, 2007) Ainsi, le confort thermique a été étudié dans trois zones différentes au premier niveau du bâtiment, la zone 16 orientée au nord, la zone 21 orientée au sud et la zone 18, centrale au bâtiment. Pour ces trois zones, l'indicateur PPD a été simulé par DesignBuilder pour les modèles avant et après rénovation. Le PPD correspond, par définition, au pourcentage de personnes insatisfaites des conditions thermiques. L'idéal, comme indiqué sur le site d'EnergiePlus, serait un indice PPD inférieur à 10%, ce qui correspond à un PMV oscillant entre -0,5 et 0,5. Il faut savoir que pour une situation thermique optimale correspondant à un PMV de 0, le pourcentage de personnes insatisfaites correspond à 5%. Les résultats de simulation pour la zone 16 sont repris à la Figure 73; pour les deux autres zones les résultats se trouvent à l'Annexe 10. Ils montrent une amélioration du confort thermique pour une grande partie de l'année, notamment en période hivernale, résultat des travaux d'isolation de l'enveloppe.

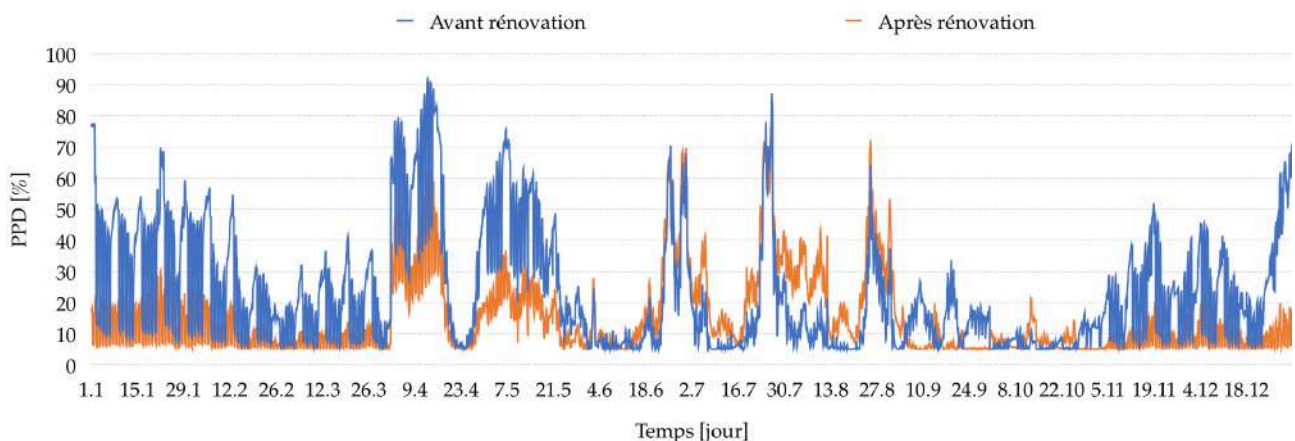


Figure 73 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour la zone 16 pour l'année 2019

La comparaison de l'indicateur PPD, dans les trois différentes zones, donne pratiquement le même résultat pour le modèle après la rénovation, comme illustré à la Figure 74. Cela n'était pas le cas avant la rénovation, comme le montre la Figure 75. Dans les zones 16 et 21, les conditions étaient meilleures en été que la zone 18 qui, elle, est centrale au bâtiment et ne possède pas d'ouverture vers l'extérieur. Et inversement, en période hivernale, les conditions de confort étaient meilleures dans la zone 18 qui possède quatre parois internes au bâtiment, contrairement aux deux autres zones dont trois de leurs parois sont extérieures, et donc les échanges de chaleur sont beaucoup plus importants. Cette observation témoigne de l'efficacité des travaux sur l'enveloppe et des groupes de ventilation qui permettent d'assurer un confort thermique constant et meilleur dans tout le bâtiment.

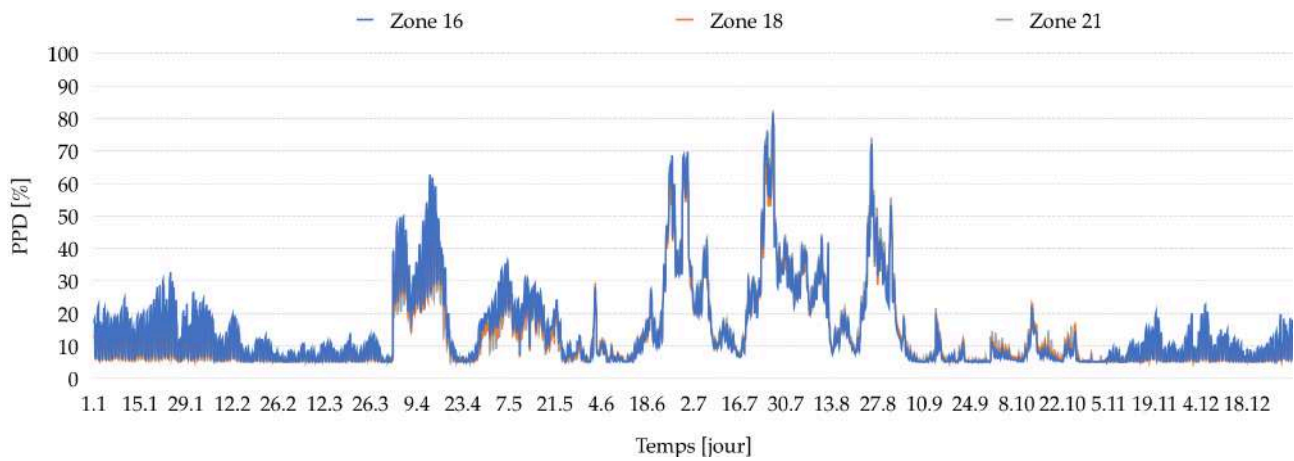


Figure 74 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les zones 16, 18 et 19 pour l'année 2019, sur le modèle après rénovation

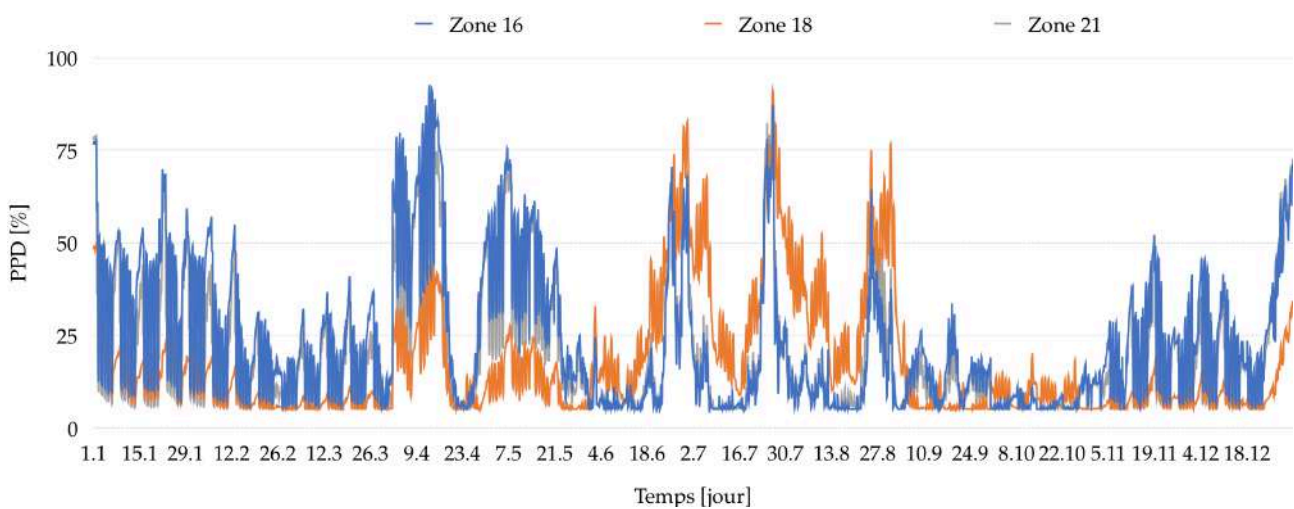


Figure 75 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les zones 16, 18 et 19 pour l'année 2019, sur le modèle avant rénovation

Les résultats montrent, également, que c'est durant les périodes où la température extérieure est élevée que les conditions de confort sont les moins satisfaisantes (Figure 76), une surchauffe est observée. Cette sensation d'inconfort est régulée par un système de ventilation nocturne intensive qui se met en marche, lorsque la température ambiante dépasse une température préalablement fixée et que le bâtiment n'est pas occupé. En journée, l'ouverture des fenêtres, pour une ventilation naturelle, et l'utilisation des volets pare-soleil, destinés à diminuer les apports solaires, sont également des éléments qui aident à limiter la surchauffe. De plus, le bâtiment étant destiné à l'enseignement, il est très peu occupé aux mois de juillet et août.

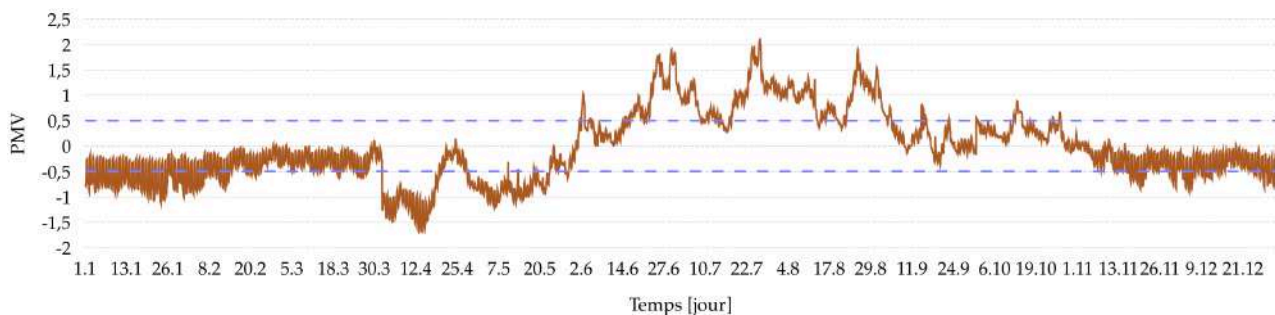


Figure 76 - Profil horaire de l'indicateur PMV pour la zone 16 pour l'année 2019, sur le modèle après rénovation

Lorsque l'on s'attarde plus sur le confort thermique, cette fois-ci uniquement pendant les heures d'occupation du bâtiment, c'est-à-dire de 7h à 19h, on constate, par exemple pour la zone 16, que 58% du temps, des conditions de confort optimales sont assurées avec un PPD inférieur à 10%, contre 41% du temps pour le bâtiment avant la rénovation (Figure 77).

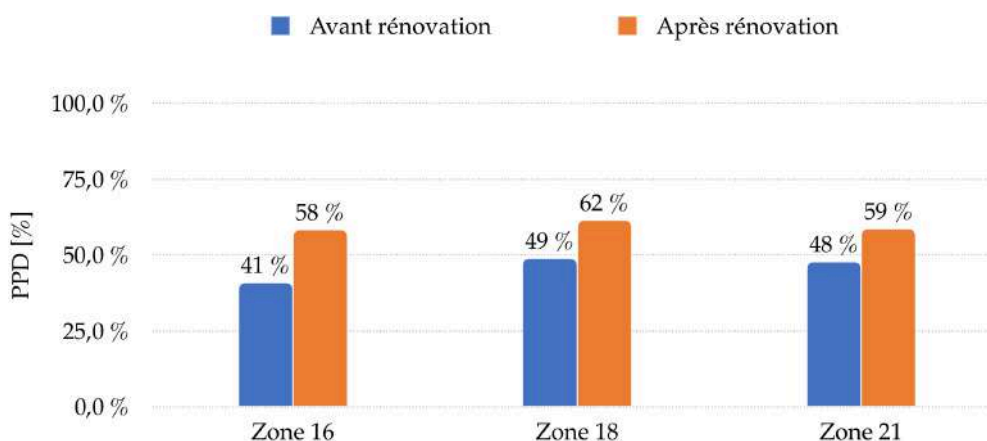


Figure 77 - Répartition du pourcentage de temps pendant lequel le confort intérieur est optimal pour les trois zones étudiées

9.5 IMPACT DU RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LE BÂTIMENT RÉNOVÉ

Pour la simulation des futurs scénarios, des données climatiques futures ont été générées par le modèle MAR et fournis par le Laboratoire de climatologie et topoclimatologie de l'Université de Liège. Ces données ont été introduites dans le modèle de simulation dynamique, pour la situation après la rénovation. Des simulations, sur ce modèle dynamique, pour un pas de 10 ans, ont permis de générer les résultats qui sont étudiés suivant deux thématiques. Une première traitera de l'évolution de la demande de chaud et de froid, et la seconde s'attardera sur l'évolution du confort thermique dans le bâtiment.

9.5.1 DEMANDE DE CHAUD ET DE FROID

Les résultats sont sans surprise. Ils indiquent que le réchauffement climatique a un impact significatif sur la demande de refroidissement et de chauffage, le premier évolue, tout naturellement, dans le sens de

l'augmentation et, le second, dans le sens de la diminution comme illustré à la Figure 78. Cette augmentation de la demande de refroidissement est une conséquence directe de l'augmentation de la température extérieure qui accroît les transferts de chaleur au travers de l'enveloppe du bâtiment, et témoigne donc de l'efficacité ou non de la rénovation réalisée sur cette enveloppe.

Les résultats montrent que la demande de froid dépasse la demande de chaud vers le milieu du siècle. Si l'on suit ce scénario d'évolution, d'ici 2100 les consommations de chaleur diminueront de moitié, tandis que la demande de froid augmentera seulement de 24,15%. Les résultats indiquent donc une diminution du chauffage qui remporte sur l'augmentation de la demande de refroidissement. Les études énumérées dans la section 2.3 démontraient, pour la plupart, que la demande de froid augmentant beaucoup plus rapidement que la demande de chaud, les émissions de gaz à effet de serre augmentaient également. Cette théorie n'est pas prouvée dans le cas du B22, en Belgique, au vu de la zone climatique dans laquelle il se situe. Ceci aurait donc un effet positif sur l'environnement, étant donné que les émissions de gaz à effet de serre diminueraient.

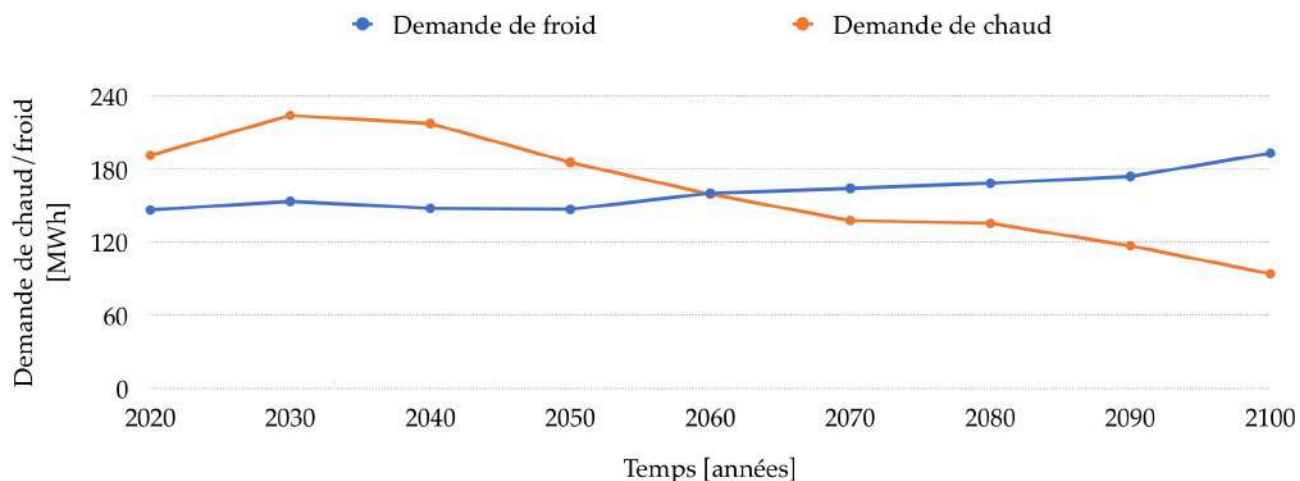


Figure 78 - Demande de chaud et de froid annuelle pour les années allant de 2020 à 2100 par pas de 10

9.5.2 CONFORT THERMIQUE

L'étude du confort thermique a été réalisée sur la zone 21. Ce choix n'est pas anodin étant donné que cette zone est exposée au sud.

D'après les résultats de la simulation présentés à la Figure 79, qui compare le profil horaire de l'indicateur PPD de l'année 2019 et de l'année 2100 pendant les périodes d'occupation, le confort thermique se dégrade tout naturellement, au fur et à mesure du temps, conséquence de l'augmentation de la surchauffe en été. Inversement, durant les périodes hivernales, les conditions de confort s'améliorent. Les résultats de dégradation du confort ont pour cause l'incapacité du système de refroidissement à subvenir aux besoins du bâtiment, ce qui entraîne une surchauffe qui a des répercussions négatives sur le confort et la santé des usagers du bâtiment. Cette grande dégradation des conditions de confort pourrait également être expliquée par le fait que le scénario choisi pour les simulations est le plus pessimiste.

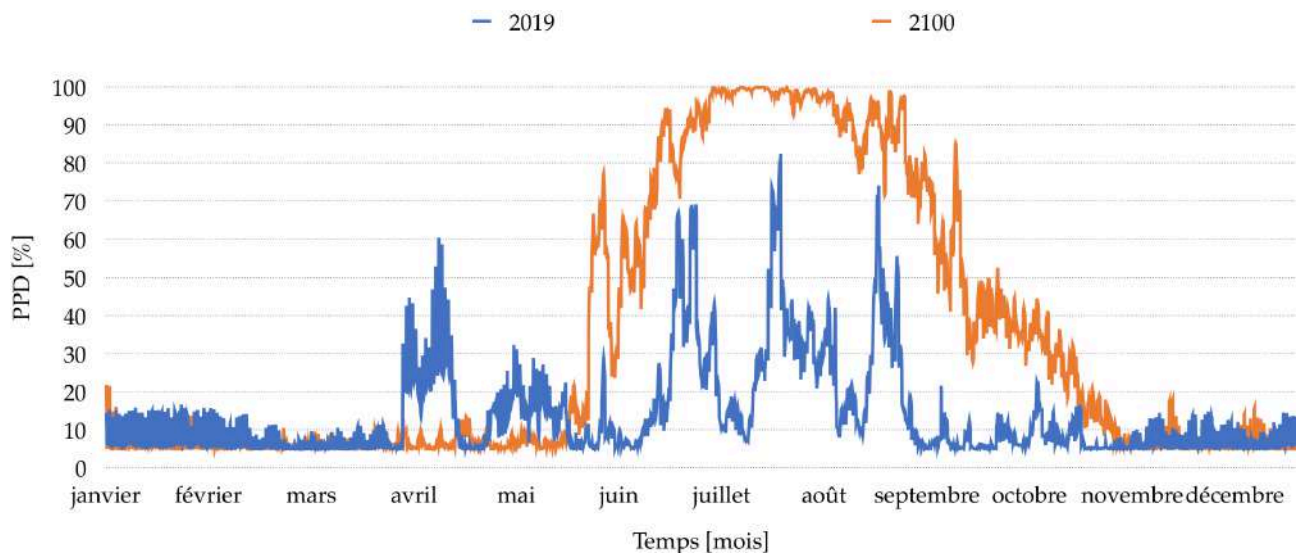


Figure 79 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour les années 2019 et 2100

Le graphe de la Figure 80 confirme cette tendance observée et donne une idée de la surchauffe. On y observe une valeur relativement élevée de l'indice PMV.

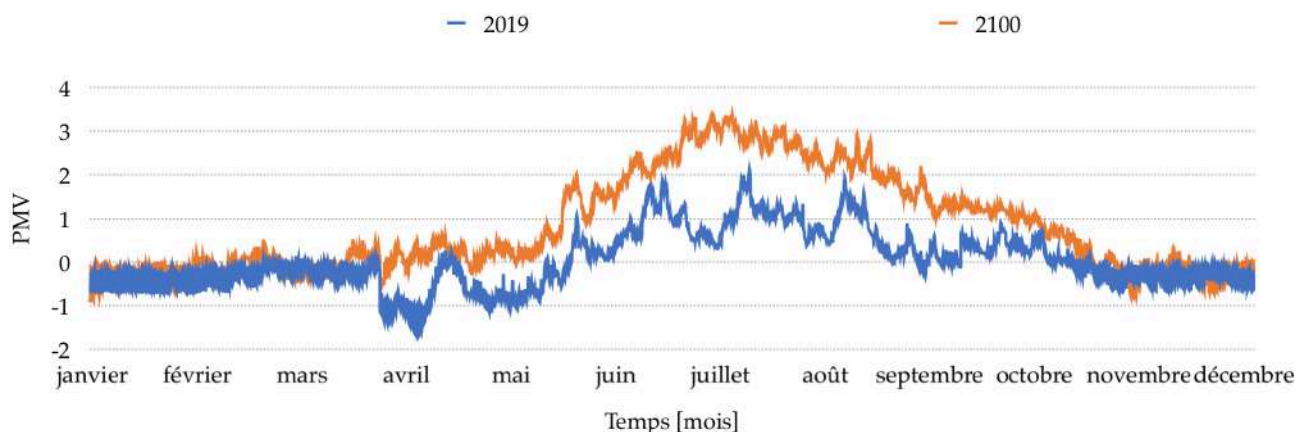


Figure 80 - Profil horaire de l'indicateur PMV pour les années 2019 et 2100

Le graphe de la Figure 81 reprend l'évolution du nombre d'heures de surchauffe pour les années 2019 et 2100 sur trois zones différentes : la zone 16, située au nord du bâtiment, la zone 18, centrale au bâtiment et la zone 21, orientée au sud. Selon la norme EN 15251 relative aux critères d'ambiance intérieure, il existe quatre catégories de bâtiments, si un niveau de confort normal est souhaité, le bâtiment est considéré comme appartenant à la catégorie « *II : Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.* » Dans le cas d'un bâtiment d'enseignement de catégorie II, la température opérative minimale est de 20°C en saison hivernale et la température opérative maximale est de 26°C en période estivale (EnergiePlus, 2014). Comme il est possible de voir sur le graphe, le nombre d'heures de surchauffe augmenterait considérablement si le réchauffement climatique va dans le sens du scénario RCP 8.5. Si en 2019, le nombre d'heures de surchauffe correspondait, en moyenne à 16% du temps, à l'avenir, il correspondra à 38% du temps.

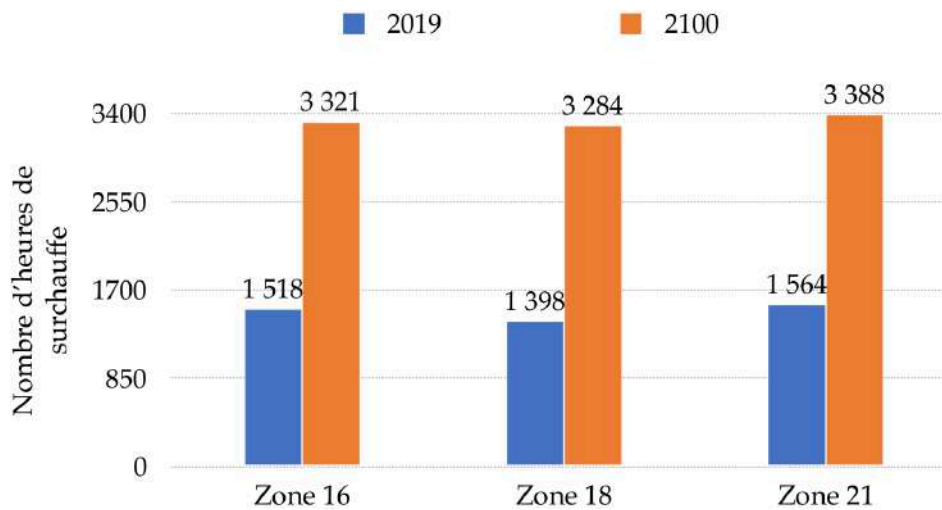


Figure 81 - Nombre d'heures de surchauffe pour les années 2019 et 2100

Comme illustré sur le graphe de la Figure 82 issu du thèse de doctorat de Jana Sillmann (2009), une augmentation de la température moyenne engendre un déplacement de la courbe de Bell vers la droite illustrant l'augmentation des canicules en été. Une faible augmentation de température, par exemple d'un degré, peut multiplier par deux la zone se situant dans la partie considérée comme étant une température relativement élevée tandis que durant les périodes hivernales, les changements sont beaucoup moins importants. Ce qui explique le fait que la surchauffe augmente tant en saison estivale et que les conditions de confort se dégradent si fortement.

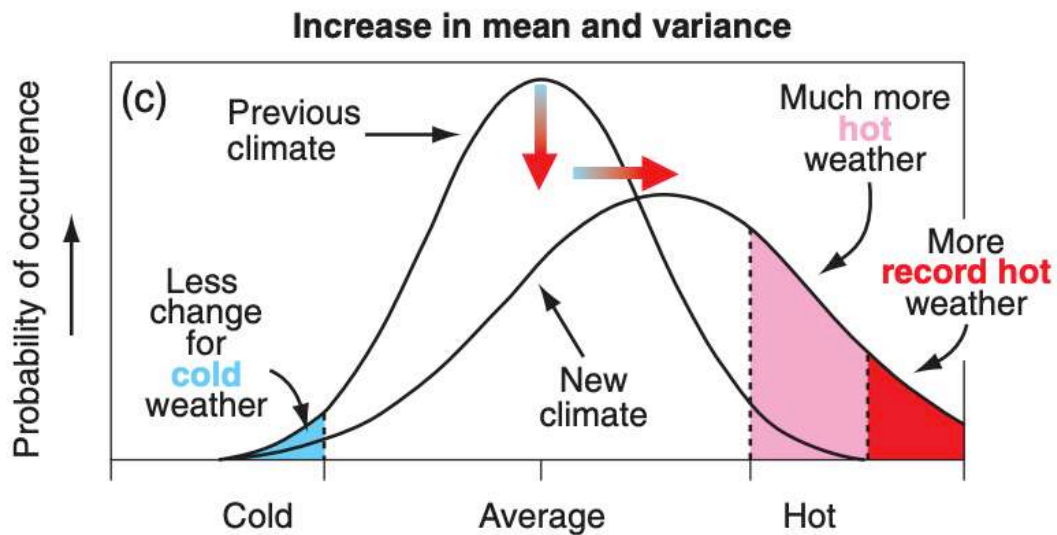


Figure 82 - Effet du réchauffement climatique sur les événements climatiques extrêmes (Sillmann, 2009)

On en vient alors à se poser la question de savoir s'il ne serait pas utile de prendre en compte le réchauffement climatique au moment du dimensionnement des systèmes, ce qui reviendrait à surdimensionner le système de refroidissement au vu de l'augmentation de la demande de froid dû au réchauffement climatique. Cependant il faut, d'une part, garder à l'esprit que les scénarios de réchauffement climatique émis par le GIEC sont basés sur des hypothèses et diffèrent fortement l'un par rapport à l'autre, il

est donc difficile de choisir le scénario sur lequel le dimensionnement pourrait se baser. De plus, des études, comme celle de Yau et Hasbi (2017) détaillée dans la section 2.3.2, ont montré qu'un système de refroidissement surdimensionné contribuerait à l'augmentation de l'inconfort des occupants et surtout, le coût initial du système et de son exploitation est beaucoup plus conséquent. De plus, le taux de gaz à effet de serre émis par un système surdimensionné est beaucoup plus important, un effet boomerang serait alors enclenché, avec une augmentation de l'impact sur le réchauffement climatique.

Comme expliqué dans la section 2.3.2, des solutions sont en voie de développement pour proposer des systèmes de refroidissement résilients permettant de lutter contre la surchauffe.

10. CONCLUSION

La problématique actuelle de changement climatique a remis en question notre façon de vivre. Des normes sont apparues dans un souci de diminution du réchauffement climatique. Le secteur du bâtiment constituant une grande partie des émissions de gaz à effet de serre, la recherche de l'efficacité énergétique dans ce secteur est apparue au coeur des enjeux de la société actuelle. La majorité des bâtiments ayant été construits avant la mise en place des premières réglementations concernant les performances énergétiques, ne respectent pas les exigences actuelles imposées. C'est donc dans la rénovation énergétique de ce patrimoine que réside un potentiel d'économie d'énergie. Une partie non négligeable des constructions anciennes est destinée à l'activité d'apprentissage. L'amélioration de l'efficacité énergétique de ces bâtiments est, non seulement pertinente pour la remise à neuf du bâti à caractère patrimonial, mais aussi et surtout pour les utilisateurs. Occupé par des étudiants, ce type d'établissement requiert une grande quantité d'énergie permettant d'assurer un niveau de confort thermique et une qualité de l'air intérieur élevés, facteurs déterminant leur productivité et santé.

C'est dans ce contexte que certaines constructions de l'Université de Liège ont fait l'objet d'une rénovation énergétique, où l'enjeu était de rénover sans retirer à ces constructions leur potentiel patrimonial. Le défi a été relevé pour la rénovation du bâtiment B22 de l'Institut de Botanique où, malgré l'importance des travaux, il a été démontré qu'il était possible de concilier une rénovation énergétique et la préservation des valeurs patrimoniales et architecturales.

Cette étude s'est alors attardée sur le cas de ce bâtiment. Ayant été rénové en 2018, il s'agissait de mesurer l'impact de cette rénovation sur le bâtiment. Deux modèles de simulation dynamiques du bâtiment ont été développés dans le logiciel DesignBuilder. Le premier représentait le bâtiment avant la rénovation, le second correspondait au bâtiment après les travaux de rénovation. Une étude approfondie du bâtiment, des systèmes présents et de ses consommations ont permis de modéliser et de calibrer les modèles dans un souci d'obtenir des modèles dont les résultats de simulation seraient le reflet de la réalité.

La rénovation énergétique vise avant tout à économiser de l'énergie et donc diminuer le coût grâce à la diminution de la consommation. La diminution de l'impact du bâtiment sur l'environnement et l'augmentation du confort des utilisateurs font également partie des objectifs de la rénovation. Ces deux modèles ont donc été comparés sur base de ces trois critères. Les résultats de simulation indiquent une diminution de consommation de chaleur de 70,3% et une diminution de la consommation d'électricité de 25,13%, avec 28,3% de la consommation totale d'électricité étant produite par les panneaux photovoltaïques. Ces résultats témoignent de l'efficacité de la rénovation sur l'enveloppe du bâtiment. Cette diminution de consommation énergétique a permis de réduire considérablement les émissions de dioxyde de carbone de 56%, et donc l'impact de la consommation d'énergie du bâtiment sur l'environnement et le réchauffement climatique. Enfin, l'étude du confort intérieur a permis de constater que la qualité de l'air est passée de

modérée à moyenne pendant les périodes d'occupation du bâtiment, lorsque l'on observe la concentration de CO₂ dans l'air, ce qui met en évidence l'efficacité de la rénovation du système de ventilation. Le confort thermique, mesuré sur base de l'indicateur PPD a, quant à lui, également été amélioré. De plus, le confort ressenti est le même dans l'ensemble du bâtiment. Cette observation témoigne, encore une fois, de l'efficacité de l'enveloppe du bâtiment qui a permis de diminuer les transferts de chaleur avec l'extérieur. L'évaluation du confort intérieur met en évidence l'influence de la stratégie de rénovation sur les conditions intérieures.

Enfin, la phase de recherche et d'étude ayant été financée par EEEF, une diminution de la consommation d'énergie de minimum 20% a été exigée suite à sa participation à la politique 20/20/20 de l'UE. Les résultats indiquent que cette exigence a été respectée.

Cette partie du travail a permis de mettre en évidence l'impact de la rénovation énergétique sur le bâtiment. A l'avenir, il serait intéressant, de mettre en place un comptage séparé pour l'électricité comme il a été fait pour la chaleur, de manière à suivre l'évolution des consommations du bâtiment dans le temps. Cette même approche pourrait être mise en oeuvre dans le cadre de l'étude de l'impact de la rénovation sur un bâtiment dans le cas d'autres bâtiments.

Bien que des exigences aient été mises en place à l'échelle européenne et locale pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre, le réchauffement climatique est un fait. Des questions se posent quant à l'efficacité des systèmes mis en place dans le futur et à la suffisance de la rénovation entreprise aujourd'hui. Dans la seconde partie, l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment a donc été évalué suivant le scénario futur de changement climatique le plus pessimiste.

La durabilité des systèmes installés dans le bâtiment, et plus particulièrement du système de refroidissement, est remis en question. D'après les résultats de la simulation thermique dynamique effectuée sur le modèle, après rénovation, l'efficacité et la durabilité du système existant devraient diminuer avec le temps, au vu du réchauffement climatique. Les résultats montrent également l'importance des conditions climatiques extérieures sur les conditions intérieures du bâtiment.

A l'avenir, il serait intéressant de penser le bâtiment en gardant bien à l'esprit l'impact futur du réchauffement climatique. Ce qui amènerait à mettre un point d'attention sur la capacité au bâtiment de s'adapter aux futurs scénarios, de manière à gérer le potentiel surchauffe qui est prédit. La mise en place de plans adaptatifs pourrait être intéressant, que ce soit dans la rénovation de bâtiments existants ou dans les nouvelles constructions.

Cette étude pourrait donc être utile aux futurs concepteurs, elle permet de les sensibiliser sur la question de l'impact des constructions sur le réchauffement climatique, et les éventuelles mesures à mettre en place pour diminuer l'impact sur l'environnement, mais aussi sur la problématique de l'impact du réchauffement climatique sur les bâtiments.

De plus, ce travail permet d'appuyer les constatations qui ont été observées sur l'impact du réchauffement climatique sur le bâtiment dans le cas-ci d'une construction située en Belgique. Ces résultats de l'impact du réchauffement climatique sur les performances énergétiques du bâtiment pourraient donc être utiles aux décideurs, en ce qui concerne la politique climatique et énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. (2015). *Guide à la rédaction d'un cahier des charges; Audit énergétique dans les bâtiments*. Consulté le 10 février 2020, à l'adresse <https://www.ademe.fr/audit-energetique-batiments>
- Administration des Ressources Immobilières. (2016). LOT 1 : Rénovation énergétique de l'Institut de Botanique B22 : Cahier spécial des charges - clauses techniques/partie techniques spéciales
- Administration des Ressources Immobilières. (2016). LOT 1 : Rénovation énergétique de l'Institut de Botanique B22 : cahier spécial des charges - clauses techniques/partie architecture
- Agence wallonne de l'air & du climat. (2016). Plan Air Climat Energie. Consulté le 27 janvier 2020, à l'adresse http://www.awac.be/images/Pierre/PACE/Plan%20Air%20climat%20energie%202016_2022.pdf
- Andrić, I., Pina, A., Ferrão, P., Fournier, J., Lacarrière, B., & Le Corre, O. (2017). The impact of climate change on building heat demand in different climate types. *Energy and Buildings*, 149, 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.047>
- Ascione, F., Borrelli, M., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2019). Energy refurbishment of a University building in cold Italian backcountry. Part 1: Audit and calibration of the numerical model. *Energy Procedia*, 159, 2-9. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.009>
- ASHRAE. (2006). *ANSI/ASHRAE Standard 140-2004 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests*. Consulté à l'adresse https://www.batisim.net/images/stories/cetteg/ansi_ashrae.pdf
- ASHRAE. (2011). *Procedure for Commercial Building Energy Audits* (2e éd.).
- Belga. (2017, avril 7). La Belgique a officiellement ratifié l'accord de Paris sur le climat. Consulté le 14 janvier 2020, à l'adresse https://www.rtf.be/info/societe/detail_la-belgique-a-officiellement-ratifie-l-accord-de-paris-sur-le-climat?id=9575250
- Bellia, L., Borrelli, M., De Masi, R. F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2018). University building: Energy diagnosis and refurbishment design with cost-optimal approach. Discussion about the effect of numerical modelling assumptions. *Journal of Building Engineering*, 18, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.02.017>
- Boutaud, A., Godron, N., & Agence Skoli. (2019). *L'humanité face aux limites de la planète Terre*. Consulté à l'adresse <https://www.millenaire3.com/publications/11-infographies-Limites-planetaires>
- Boittiaux, P. (2017). *Le coût du changement climatique*. Consulté à l'adresse <https://fr.statista.com/infographie/11653/le-co%25C3%25BBt-du-changement-climatique/>
- Brouwers J., Demuzere M., Van Steertegem M., Deoor W., van Lipzig N., Craninx M., Wouters H., Peeters B., Cauwenberghs K., Beullens J., Willems P., Ridder K. D., Maiheu B., Troch R. D., Termonia P., Vansteenkiste T. et Maetens W. (2015). MIRA Climate Report 2015: about observed and future climate changes in Flanders and Belgium. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2055.8809>

Bureau fédéral du Plan. (2020, 2 juin). Indice des prix à la consommation - Prévisions d'inflation [02/06/2020]. Consulté 8 juin 2020, à l'adresse <https://www.plan.be/databases/17-fr-indice+des+prix+a+la+consommation+previsions+d+inflation>

Cadre d'action en matière de climat et d'énergie d'ici à 2030. (2017, février 16). Consulté le 14 janvier 2020, à l'adresse https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_fr

Cassar, M. (2009, janvier). Sustainable Heritage : Challenges and Strategies for the Twenty-First Century. *APT BULLETIN: JOURNAL OF PRESERVATION TECHNOLOGY*, 40. Consulté à l'adresse <https://discovery.ucl.ac.uk>

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2016). *The human cost of weather related disasters*. Consulté à l'adresse https://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf

Commissariat général au développement durable. (2020). *Chiffres clés du climat: France, Europe et Monde*. Consulté à l'adresse https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-11/datalab-62-chiffres-cles-du-climat-france-europe-monde-edition2020-novembre2019_0.pdf

Commission européenne. (2016, novembre 30). Une énergie propre pour tous les Européens - libérer le potentiel de croissance de l'Europe. Consulté le 22 janvier 2020, à l'adresse https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_16_4009

Conseil européen. (2012, octobre 25). Directive 2012/27/UE du parlement européen et du conseil relatif à l'efficacité énergétique. Consulté le 13 février 2020, à l'adresse <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&from=EN>

Conseil de l'UE. (2018, janvier 17). Règlement sur la répartition de l'effort : les ambassadeurs auprès de l'UE approuvent l'accord provisoire. Consulté le 14 janvier 2020, à l'adresse <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2018/01/17/effort-sharing-regulation/>

COP 25: un résultat décevant. (s. d.). Consulté le 2 janvier 2020, à l'adresse <https://www.climat.be/fr-be/politiques/politique-internationale/conferences-climatiques/2019-cop25-madrid/>

De Bouw, M., Dubois, S., & Vanhellemont, Y. (2016). *Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings*. Consulté à l'adresse https://www.eechb.eu/wp-content/uploads/2016/12/Proceedings_EECHB.pdf

De Santoli, L. (2015). Guidelines on energy efficiency of cultural heritage. *Guidelines on energy efficiency of cultural heritage*, 86, 534-540. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.050>

Descamp, F., Haesendonck, D., Lemineur, P., Bronselaer, G., & Hayen, R. (2018). *DEMI MORE : une approche intégrée du processus de conservation*. Consulté à l'adresse http://maakmonumentenduurzaam.eu/wp-content/uploads/2019/01/DEMIMORE.BWF_.39.ProcessusDeConservationIntégré.pdf

Dewallef, P., Lemort, V., Randaxhe, F., & Schyns, D. (2015). Proposition de missions à confier au Laboratoire de Thermodynamique Appliquée dans le cadre du projet EEEF.

Dias Pereira, L., Raimondo, D., Corgnati, S.P. and Gameiro Da Silva, M. (2014), Energy consumption in schools, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 40, December, pp. 911-922.

Dirks, J. A., Gorrissen, W. J., Hathaway, J. H., Skorski, D. C., Scott, M. J., Pulsipher, T. C., ... Rice, J. S. (2015). Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach. *Energy*, 79, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.081>

Dumazet, G. (2014, octobre 29). Le GIEC, qu'est-ce que c'est ? Consulté le 14 janvier 2020, à l'adresse <https://www.geo.fr/histoire/giec-climat-47356>

EnergiePlus. (2007, septembre 25). Confort thermique : généralité. Consulté le 4 mai 2020, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>

EnergiePlus. (2007, septembre 25). NBN EN 13779 (2007) concernant la ventilation des bâtiments non résidentiels. Consulté le 15 mai 2020, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/reglementations/ventilation9/norme-nbn-en-13779-la-ventilation-des-batiments/>

EnergiePlus. (2007, novembre 6). Emissions de polluants liées à la consommation énergétique. Consulté le 9 mai 2020, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/theories/consommation-energetique/les-emissions-de-polluants-liee-a-la-consommation-energetique/>

EnergiePlus. (2014, janvier 30). Norme NBN EN 15251:2007 : Critères d'ambiance intérieure. Consulté le 30 mai 2020, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/reglementations/confort44/norme-nbn-en-15251-2007-criteres-d-ambiance-interieure/>

EnergiePlus. (2020, janvier 27). NBN EN 13779 (2007) concernant la ventilation des bâtiments non résidentiels. Consulté le 10 avril 2020, à l'adresse <https://energieplus-lesite.be/reglementations/ventilation9/norme-nbn-en-13779-la-ventilation-des-batiments/>

EnergyPlus. (s. d.). EnergyPlus | EnergyPlus. Consulté le 2 mars 2020, à l'adresse <https://energyplus.net>

Energy in buildings and Communities Programme. (2019). IEA EBC Annex 80 on Resilient Cooling for Residential and Small Non-Residential Buildings. Consulté à l'adresse <https://annex80.iea-ebc.org>

Engie. (2020, 1 juin). Paramètres d'indexation de gaz | ENGIE. Consulté le 3 juin 2020, à l'adresse <https://www.engie.be/fr/energie/electricite-gaz/prix-conditions/parametres-indexation/parametres-indexation-gaz/>

Engie. (2020, 1 juin). Paramètres d'indexation d'électricité | ENGIE. Consulté le 3 juin 2020, à l'adresse <https://www.engie.be/fr/energie/electricite-gaz/prix-conditions/parametres-indexation/parametres-indexation-electricite/>

European energy efficiency fund. (s. d.). Objective of the Fund. Consulté le 27 février 2020, à l'adresse <https://www.ecef.eu/objective-of-the-fund.html>

EM-DAT. (2020). Emdat_db [Base de données]. Consulté à l'adresse https://www.emdat.be/emdat_db/

Fondation d'entreprise Alcen pour la connaissance des Energies. (2015, octobre 28). Protocole de Kyoto. Consulté le 22 janvier 2020, à l'adresse <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/protocole-de-kyoto>

Frankignoulle, P. (2014). Le domaine universitaire de Liège et son patrimoine architectural. Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/2268/181563>

Fryns, J. (2013). *Ulg bâtiment B22*.

- GIEC. (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse (4)*. Consulté à l'adresse https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_fr.pdf
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse (5)*. Consulté à l'adresse https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf
- Gouvernement bruxellois, *Alliance Emploi-Environnement*. (2019). Consulté à l'adresse http://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/2017-07/Alliance_emploi_environnement_plan_pluriannuel_2016_2019.pdf
- Gouvernement wallon. (2017). *Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment*. Consulté à l'adresse <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/strategie-wallonne-a-long-terme-pour-la-renovation-energetique-des-batiment.pdf?ID=47301>
- G. (2019, février 19). Effinergie lance un label pour la rénovation énergétique du patrimoine. Consulté le 12 février 2020, à l'adresse <https://www.batiactu.com/edito/effinergie-lance-un-label-renovation-energetique-patrimoine-55532.php>
- IRM. (s. d.). IRM - Le climat à l'horizon 2100. Consulté le 2 février 2020, à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/climat/le-climat-a-lhorizon-2100>
- IRM. (2020). *Tendances observées à Uccle* [Base de données]. Consulté à l'adresse <https://www.meteo.be/fr/climat/tendances-climatiques-observees/a-uccle/temperature-de-lair/moyenne/annuel>
- International Council on Monuments and Sites. (1965). Charte internationale sur la conservation et la restauration des monuments et des sites (Charte de Venise 1964). Consulté le 19 janvier 2020, à l'adresse https://www.icomos.org/charters/venice_f.pdf
- Krarti, M., & Marchio, D. (2016). *Guide technique d'audit énergétique*. Paris, France : Presses des Mines.
- Laboratoire de Thermodynamique de l'Université de Liège. (2015). Proposition de missions à confier au Laboratoire de Thermodynamique Appliquée dans le cadre du projet EEEF.
- L'accord de Paris. (s. d.). Consulté le 1 février 2020, à l'adresse <https://www.climat.be/fr-be/politiques/politique-internationale/accord-de-paris>
- Lacroix, P. (2018). Habiter nos territoires après l'effondrement. *Les échos du logement*, (124), 04-09.
- La contribution des principaux secteurs aux émissions totales et leur évolution. (s. d.). Consulté le 29 janvier 2020, à l'adresse <https://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/en-belgique/emissions-belges/emissions-par-secteur>
- Marbaix, P., Gaino, B., & Van Ypersele, J.-P. (2018). *Empreinte carbone : De quelles émissions sommes-nous responsables et comment les réduire ?* (9). Consulté à l'adresse https://plateforme-wallonie-giec.be/assets/documents/P_Wallonie-GIEC_Lettre9.pdf
- Margini, A., Gobbi, L., & d'Ambrosio, F. R. (2016). Energy Audit of Public Buildings: The Energy Consumption of a University with Modern and Historical Buildings. Some Results. *Energy Procedia*, 101, 169-175. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.022>
- Mata, E., Kalagasidis, A.S., Johnsson, F. (2013) A modelling strategy for energy, carbon, and cost assessments of building stocks, *Energy Build.* (56) 100–108.

- Meijer, F., Itard, L., & Sunikka-Blank, M. (2009). Comparing European residential building stocks : performance, renovation and policy opportunities. *Building Research & Information*, 37(5-6), 533-551. <https://doi.org/10.1080/09613210903189376>
- Meyer S. et Maréchal K., 2016. Policy brief - 'Split incentive(s)' et rénovation énergétique des logements, Policy Papers CEB 16-001, ULB, 12p.
- Micha, E., & Housen, J. (s. d.). Carnets du Patrimoine - Le Sart Tilman. Consulté le 14 février 2020, à l'adresse https://www.ulg.ac.be/cms/c_186022/carnets-du-patrimoine-le-sart-tilman?portal=j_55&printView=true
- Micha, E. (2000). Evolution de l'architecture du domaine universitaire du Sart Tilman.
- Mlecnik, E., Hilderson, W., Cre, J., Desmidt, I., Uytendaele, Van Den Abeele, S., ... Henz, O. (2011). Low energy housing retrofit (LEHR), final report. Belgian Science Policy.
- Morelli, M., Harrestrup, M., & Svendsen, S. (2014). Method for a component-based economic optimisation in design of whole building renovation versus demolishing and rebuilding. *Energy Policy*, 65, 305-314. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.068>
- Nations Unies. (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Consulté le 21 janvier 2020, à l'adresse <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convfr.pdf>
- Observatoire BBC. (2019). La rénovation de bâtiments à caractère patrimonial. *Rénovation*, (14). Consulté à l'adresse https://www.effinergie.org/web/images/attach/base_doc/2425/201902observatoire-patrimoine.pdf
- Olivier, A.-C. (2014). *La rénovation énergétique des bâtiments à intérêt patrimonial*. Consulté à l'adresse https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2423/1/2013_2014_OLIVIER_Anne-Claire.pdf
- Ostojčić, S., Veršić, Z., & Muraj, I. (2016). Energy analysis and refurbishment strategy for Zagreb University buildings: Former Faculty of Technology in Zagreb by Alfred Albini. *Energy and Buildings*, 115, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.043>
- Parlement wallon. (2019, septembre 13). Déclaration de politique régionale 2019-2024. Consulté le 27 janvier 2020, à l'adresse http://nautilus.parlement-wallon.be/Archives/2019_2020/DPR/34_1.pdf
- Power, A. (2008). Does demolition or refurbishment of old and inefficient homes help to increase our environmental, social and economic viability? *Energy Policy*, 36(12), 4487-4501. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.022>
- Prégardien, M., & Marique, A.-F. (2019). Energy retrofitting of building with a view to heritage values: The case of modernist buildings of ULiège in Belgium. Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/2268/238194>
- Randaxhe, F. (2016). Institut de botanique – Bâtiment B22.
- Région wallonne. (2016, septembre 8). Arrêté du Gouvernement wallon instaurant une obligation d'audit énergétique en exécution du décret du 9 décembre 1993 relatif à la promotion de l'utilisation rationnelle de l'énergie, des économies d'énergie et des énergies renouvelables. Consulté le 13 février 2020, à l'adresse <https://wallex.wallonie.be/contents/acts/4/4204/1.html?doc=30219&rev=31792-20762>
- Ruellan, G. (2016). *Etat de marché de la rénovation du bâti résidentiel en Belgique*. Consulté à l'adresse <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/202946/1/Rapport%201%20-%20Revue%20de%20littérature.pdf>

Ryckmans, G. (2020, février 11). Voici comment le réchauffement climatique pourrait avoir un impact sur la côte belge. Consulté le 20 janvier 2020, à l'adresse https://www.rtb.be/info/societe/detail_voici-comment-le-rechauffement-climatique-pourrait-avoir-un-impact-sur-la-cote-belge?id=10429531

Salagnac, J.-L. (2016). Rendre les bâtiments moins vulnérables aux risques naturels. *Responsabilité & environnement*, (43), 47-53. Consulté à l'adresse <http://www.annales.org/re/2006/re43/Salagnac.pdf>

Schoune, C. (2004, juillet 1). La canicule a tué 1.300 fois en 2003 Santé - Un premier « plan canicule » mis sur les rails par le ministre Rudy Demotte L'été 2003 a tué 1.300 fois PRATIQUE. Consulté le 30 mai 2020, à l'adresse https://www.lesoir.be/art/la-canicule-a-tue-1-300-fois-en-2003-sante-un-premier-p_t-20040701-Z0PJ95.html

Schyns, D. (2016). Projet EEEF - Partie cogénération : point 1 (simulation de l'impact d'une diminution de la consommation sur le fonctionnement du réseau de distribution de chaleur).

Sesana, M. M., Grecchi, M., Salvalai, G., & Rasica, C. (2016). Methodology of energy efficient building refurbishment: Application on two university campus-building case studies in Italy with engineering students. *Journal of Building Engineering*, 6, 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2016.02.006>

Stable. (2019). *Be.STAT* [Base de données]. Consulté à l'adresse <https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?view=71531f66-ca70-4112-8c4c-0ac3c92a6827>

Sillmann, J., 2009. Extreme Climate Events and Euro-Atlantic Atmospheric Blocking in Present and Future Climate Model Simulations.

SPW - DGO4. (2019). *Consommation d'énergie du secteur tertiaire* en Wallonie* [graphique]. Consulté à l'adresse <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/TERT%201.html>

Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... Sorlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

Stevens, R., & Servigne, P. (2013). *L'anthropocène l'ère de l'incertitude*. Consulté à l'adresse <http://www.barricade.be/sites/default/files/publications/pdf/2013raphaelpablo-anthropocene.pdf>

Service Public de Wallonie. (2018). *Mise au point d'une méthode d'audit énergétique pour le tertiaire et l'industrie: Méthodologie unifiée*. Consulté à l'adresse https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/pi_auditionifie_methodologie_rev2_20180906.pdf?ID=46983

Service public de Wallonie. (2019). Éco-efficience du secteur tertiaire. Consulté 1 mars 2020, à l'adresse <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/TERT%201.html>

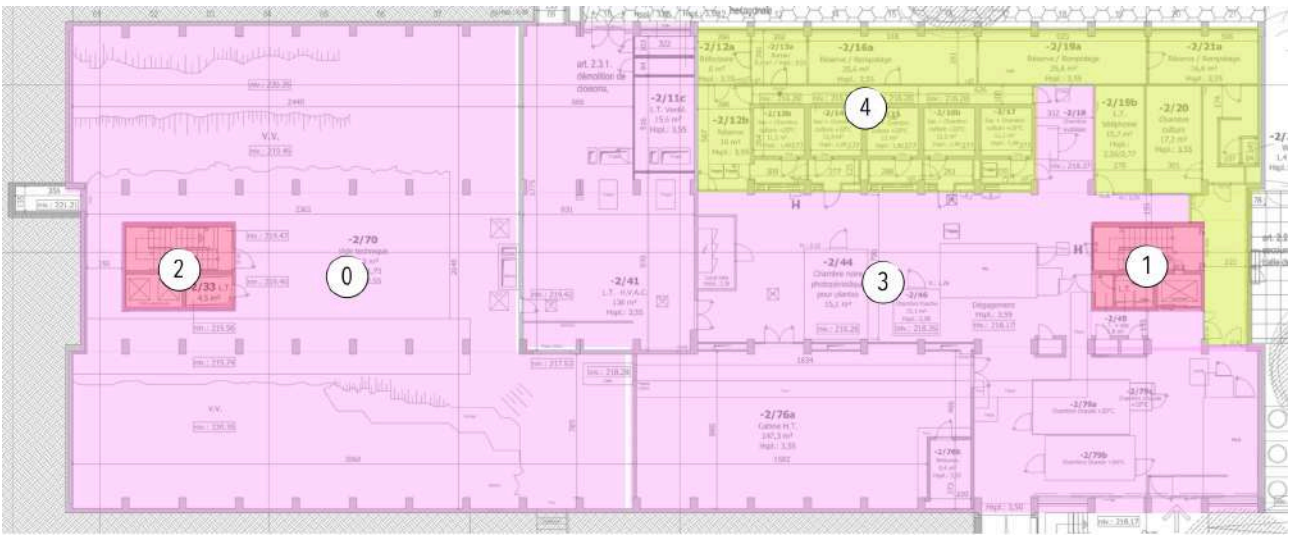
Teen Consulting. (2015). *Audit Énergétique*.

Troi, A. (2016). *Comfort and energy efficiency in historic buildings – the 3ENCULT experience*. Consulté à l'adresse https://www.eechb.eu/wp-content/uploads/2016/12/Proceedings_EECHB.pdf

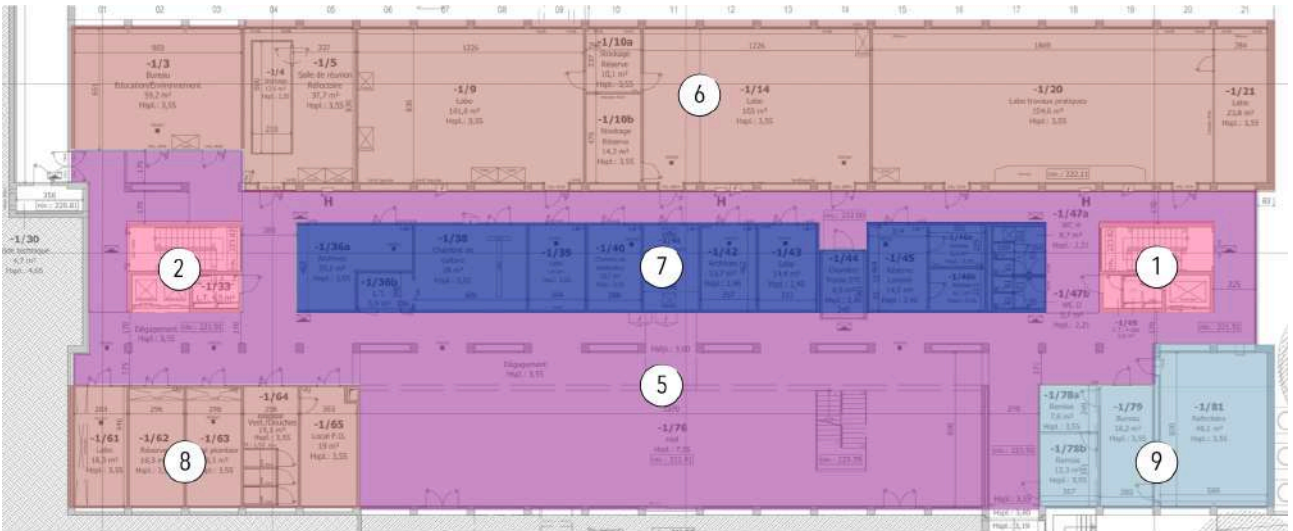
United Nations Climate Change. (2018, août 16). Jour du dépassement : en 7 mois, l'humanité a consommé les ressources annuelles de la Terre. Consulté le 24 janvier 2020, à l'adresse <https://unfccc.int/fr/news/jour-du-depassement-en-7-mois-l-humanite-a-consomme-les-ressources-annuelles-de-la-terre>

- Université de Liège. (2011, novembre 14). Le campus du Sart Tilman chauffé grâce à la cogénération biomasse. Consulté le 13 mars 2020, à l'adresse https://www.uliege.be/cms/c_1383226/fr/le-campus-du-sart-tilman-chauffe-grace-a-la-cogeneration-biomasse
- Université de Liège. (2014, juin 18). Levée de 1,5 million d'euros auprès de l'EEEEF. Consulté le 26 février 2020, à l'adresse https://www.uliege.be/cms/c_4534990/fr/levee-de-1-5-million-d-euros-aupres-de-l-eeef
- Université de Liège. (2018, juin 21). L'ULiège lauréate au Prix Belge de l'Énergie et de l'Environnement. Consulté le 28 février 2020, à l'adresse https://www.uliege.be/cms/c_10082678/fr/l-uliege-laureate-au-prix-belge-de-l-energie-et-de-l-environnement
- Vrijders, J., & Loncour, X. (2016, janvier). La rénovation énergétique : un défi et une opportunité. Consulté le 19 janvier 2020, à l'adresse <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact49&art=731>
- Wackernagel, M., Halle, M., & Mattoon, S. (s. d.). *Atlas de l'empreinte écologique et de la biocapacité des pays membres de la francophonie*. Consulté à l'adresse https://www.footprintnetwork.org/content/images/article_uploads/Francophonie_Atlas_2013_web.pdf
- Wan, K. K. W., Li, D. H. W., Pan, W., & Lam, J. C. (2012). Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications. *Applied Energy*, 97, 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.048>
- Winkin, M. (2019). La rénovation énergétique d'un bâtiment patrimonial classé en milieu rural. Étude de cas : l'ancien presbytère de Rachamps. Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/2268.2/6887>
- Wyard, C. (2019). Climate change in Belgium: recent and future evolution of global radiation and hydro-climatic conditions favouring oods using the regional climate model MAR. Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/2268/229180>
- Yau, Y. H., & Hasbi, S. (2017). A Comprehensive Case Study of Climate Change Impacts on the Cooling Load in an Air-Conditioned Office Building in Malaysia. *Energy Procedia*, 143, 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.687>

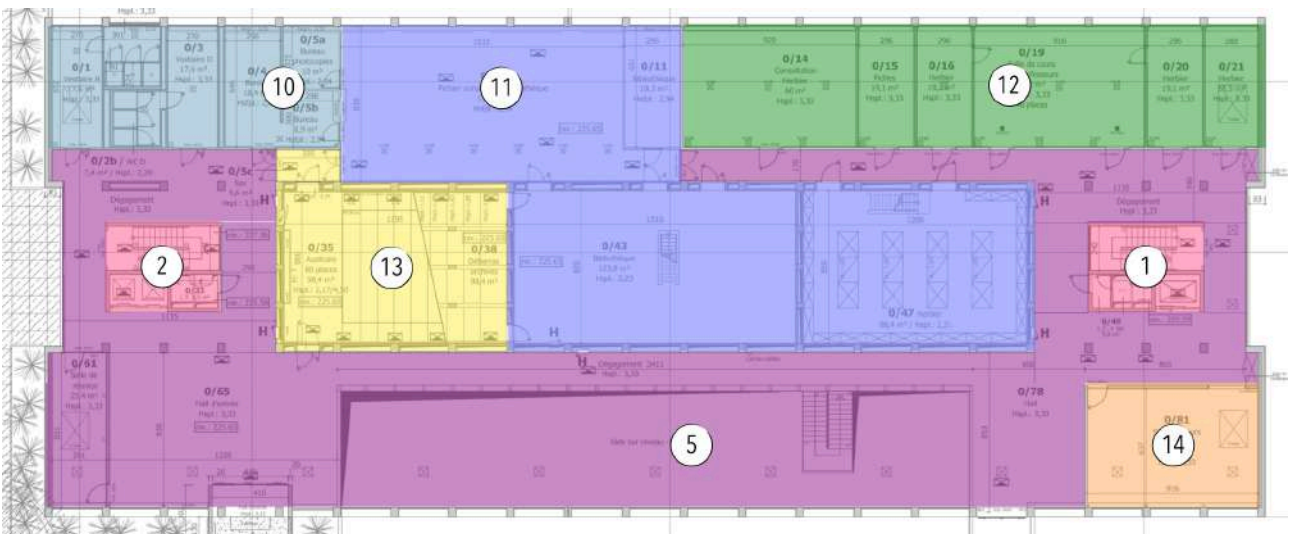
ANNEXE 1 – ZONAGE



Annexe 1 - Zonage du R-2



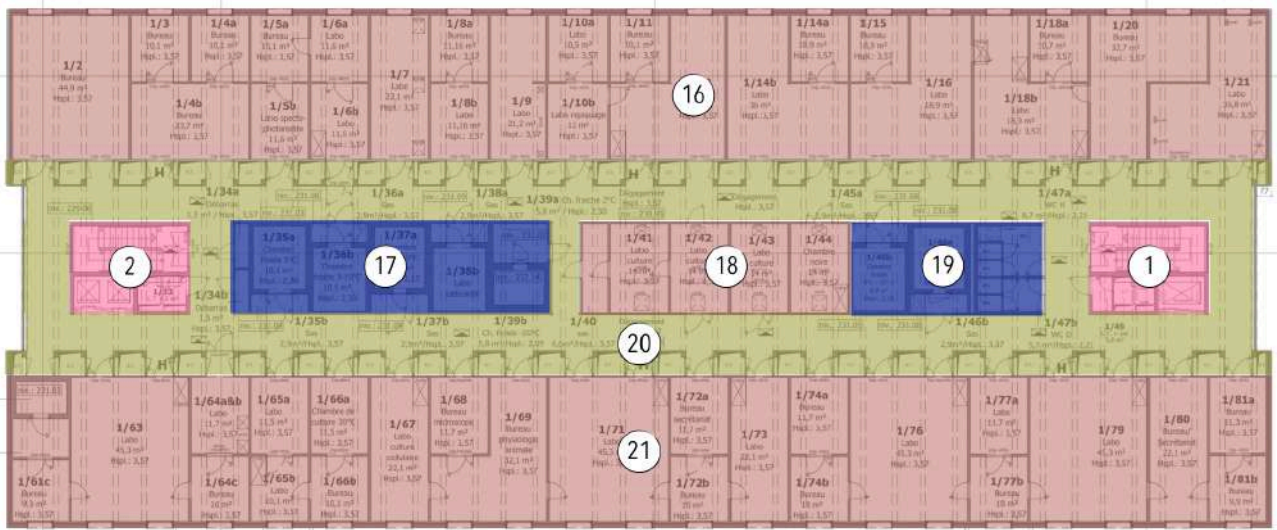
Annexe 1 - Zonage du R-1



Annexe 1 - Zonage du R0



Annexe 1 - Zonage du niveau technique



Annexe 1 - Zonage du R+1

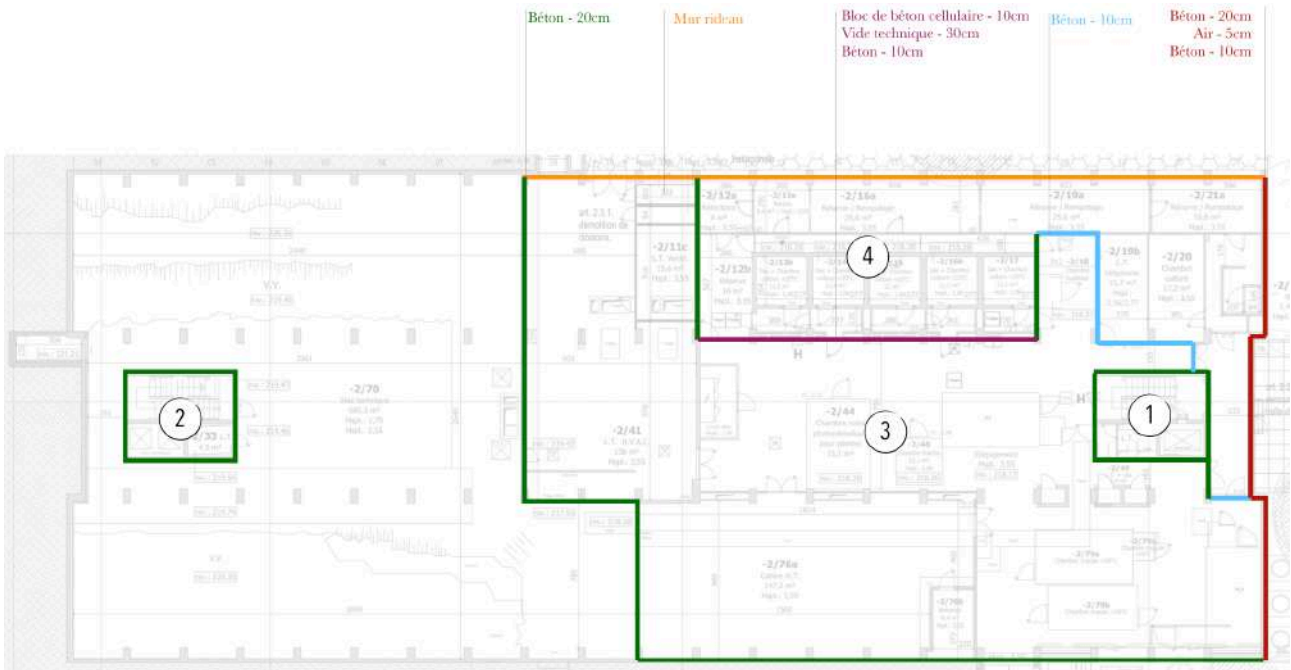


Annexe 1 - Zonage du R+2

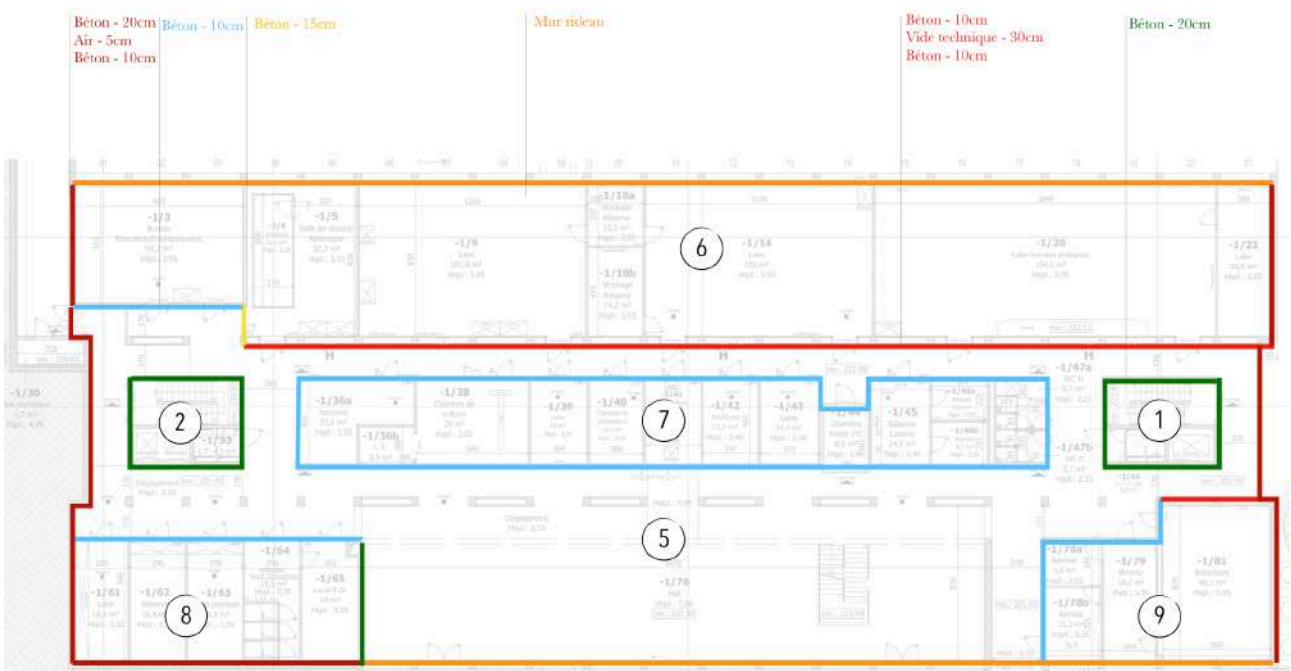
ANNEXE 2 – DONNÉES ENCODÉES DANS L'ONGLET ACTIVITÉ (MODÈLE 1)

ZONE	PRÉDÉFINITIONS	OCCUPANCY	CONTRÔLE D'AMBIANCE	ORDINATEURS		EQUIPEMENTS DE BUREAU		DIVERS	CUISINE		PROCESS		
				ON/OFF	ECLAIRAGE	ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE [W/m²]		ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE [W/m²]		ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE [W/m²]
	TYPE DE ZONE	DENSITÉ D'OCCUPATION [PERSONNE/m²]	CHAUFFAGE [°C]	ECLAIRAGE	FRACTION RADIANTE	ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE [W/m²]	ON/OFF	FRACTION RADIANTE	ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE [W/m²]	FRACTION RADIANTE	
				ECLAIRAGE SOUHAITÉ [LUX]									
0	2-Semi-extérieur non conditionné	0	/	0	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
1	1-Standard	0,1065	/	150	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
2	1-Standard	0,1065	/	150	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
3	2-Semi-extérieur non conditionné	0	/	0	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
15	4-Plenum	0	/	0	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
31	2-Semi-extérieur non conditionné	0	/	0	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	/	/	
4	1-Standard	0,11	21	175	OFF	OFF	/	OFF	/	OFF	ON	4,01	0,5
5	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
9	1-Standard	0	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
10	1-Standard	3	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
26	1-Standard	12	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
30	1-Standard	4	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
6	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
8	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
16	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
18	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
21	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
22	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
23	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
25	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
27	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
28	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
7	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	ON	ON	ON	4,01	0,5
17	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	ON	ON	ON	4,01	0,5
19	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	ON	ON	ON	4,01	0,5
11	1-Standard	0,1065	21	175	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
12	1-Standard	0,1065	21	260	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
14	1-Standard	0,6164	21	175	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
13	1-Standard	0,8130	21	175	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
20	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
24	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5
29	1-Standard	0,1065	21	150	OFF	ON	3,49	0,75	OFF	ON	ON	4,01	0,5

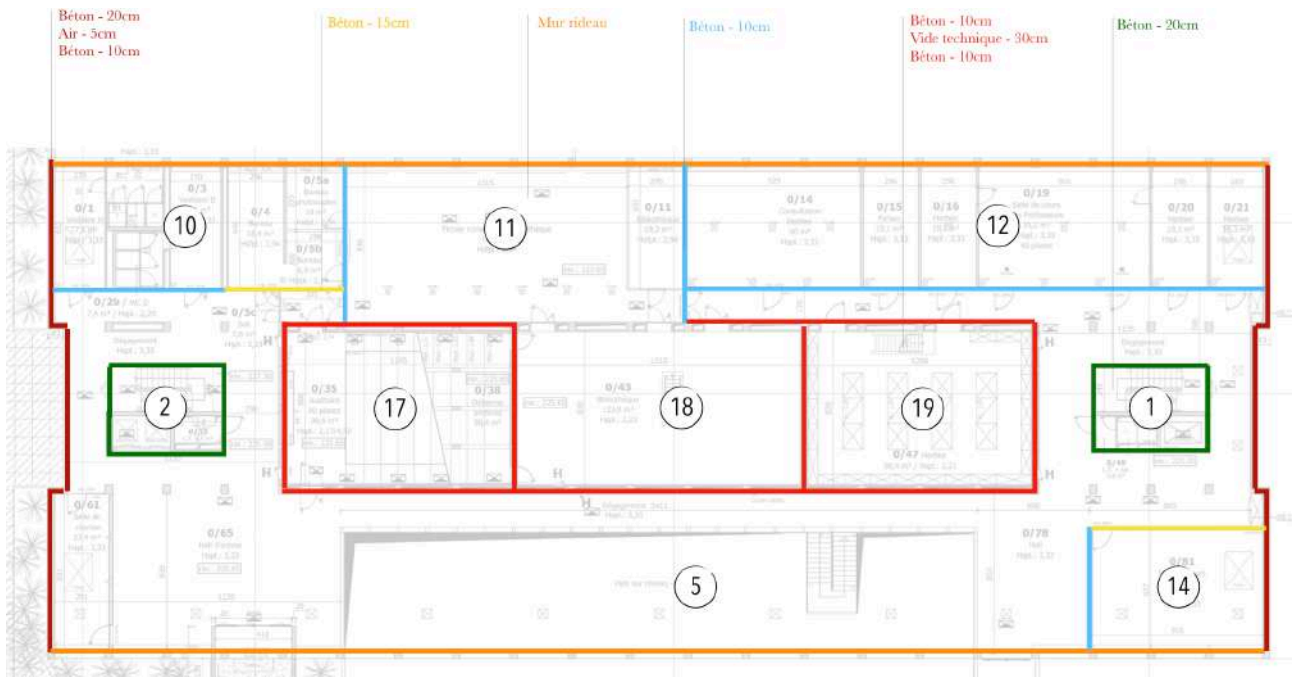
ANNEXE 3 – COMPOSITION DE L'ENVELOPPE (MODÈLE 1)



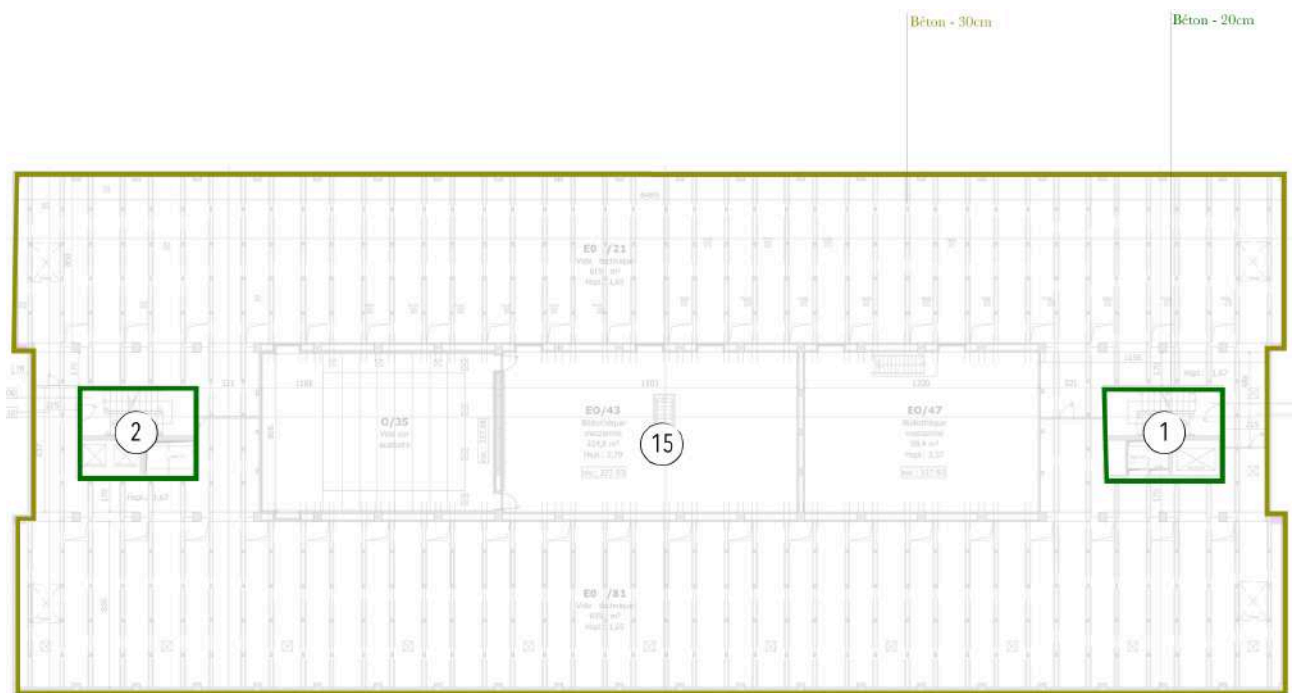
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R-2): Situation avant rénovation



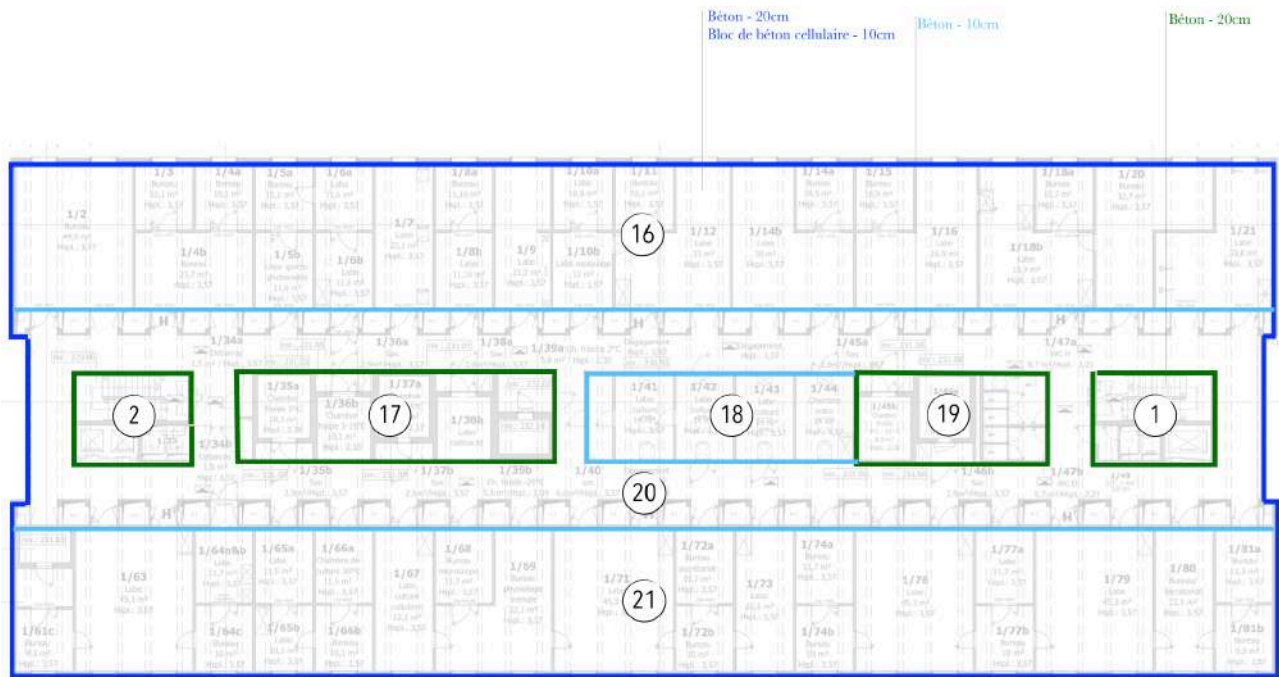
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R-1): Situation avant rénovation



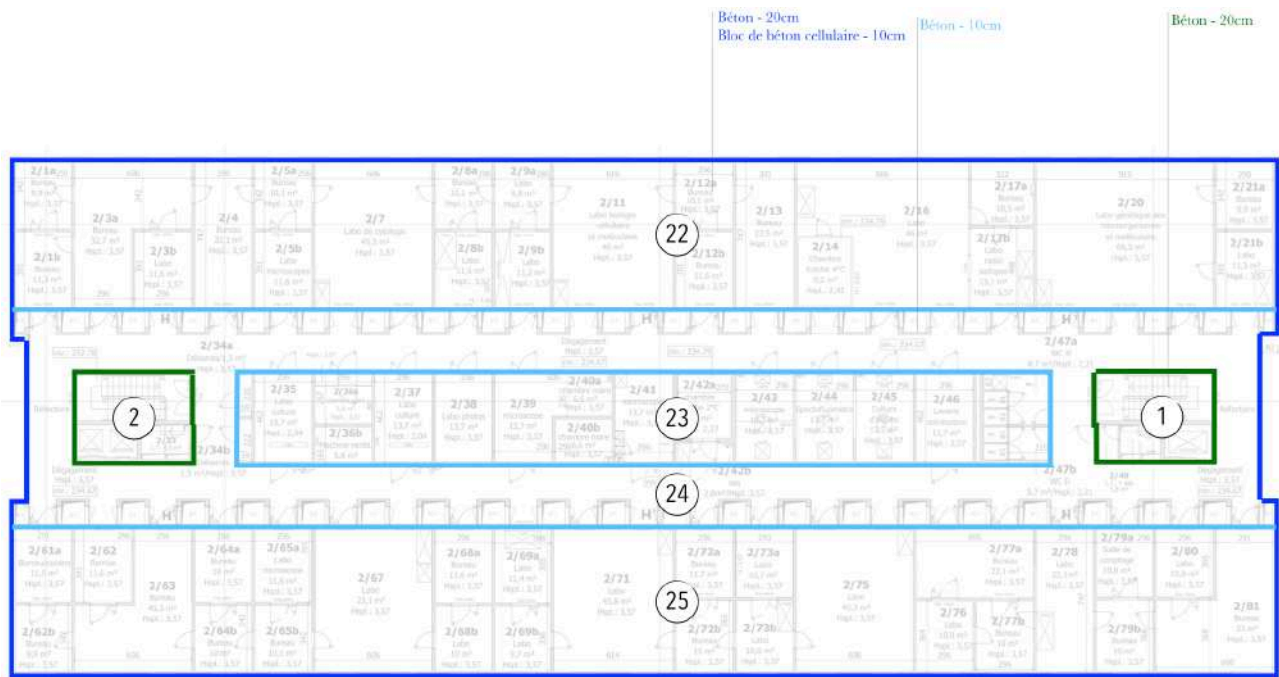
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R0): Situation avant rénovation



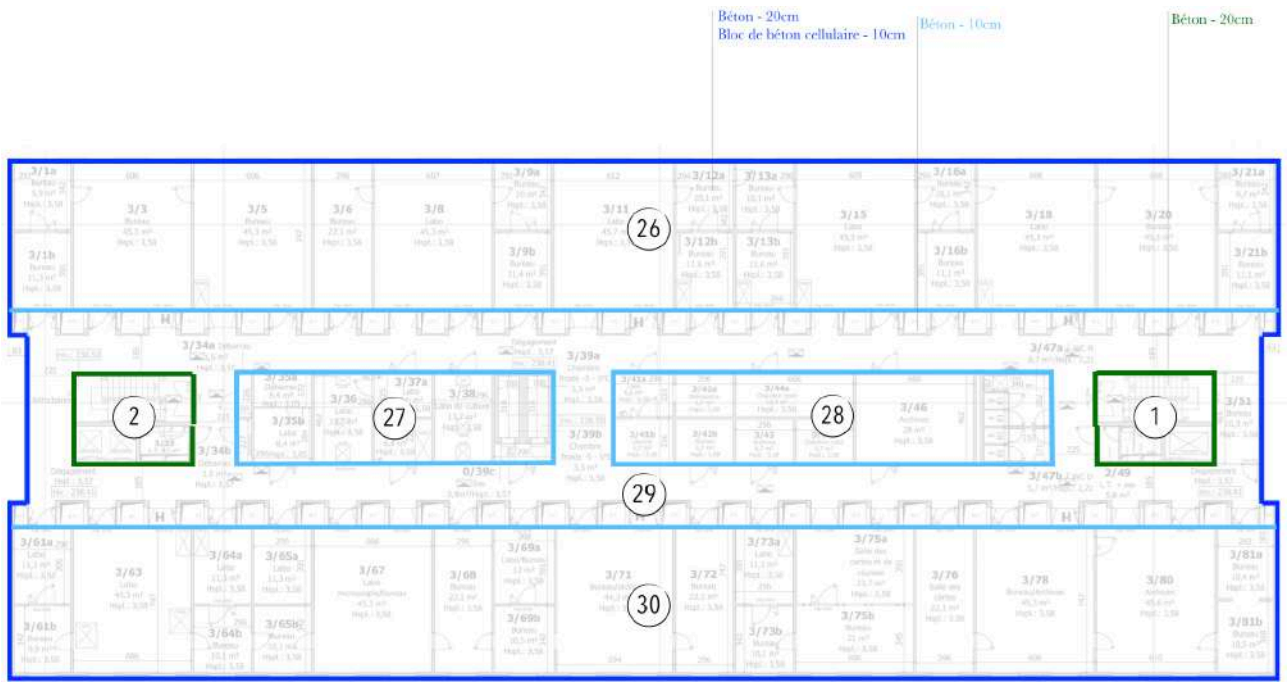
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (niveau technique): Situation avant rénovation



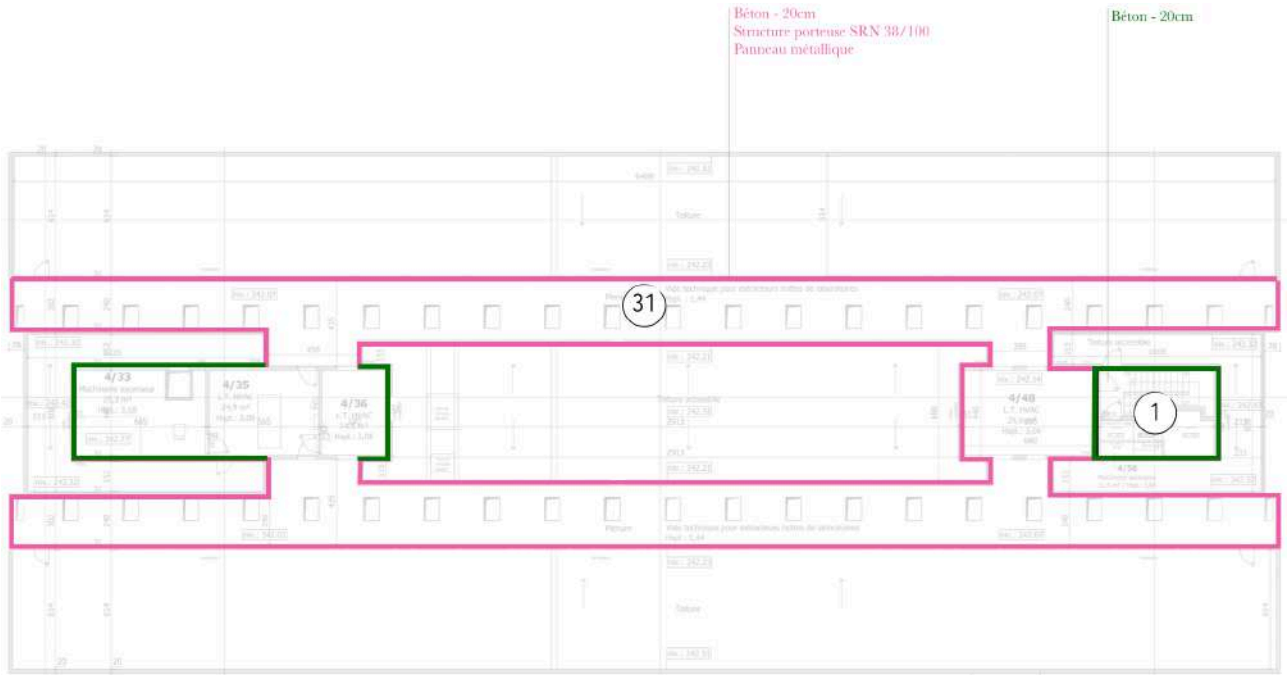
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R+1): Situation avant rénovation



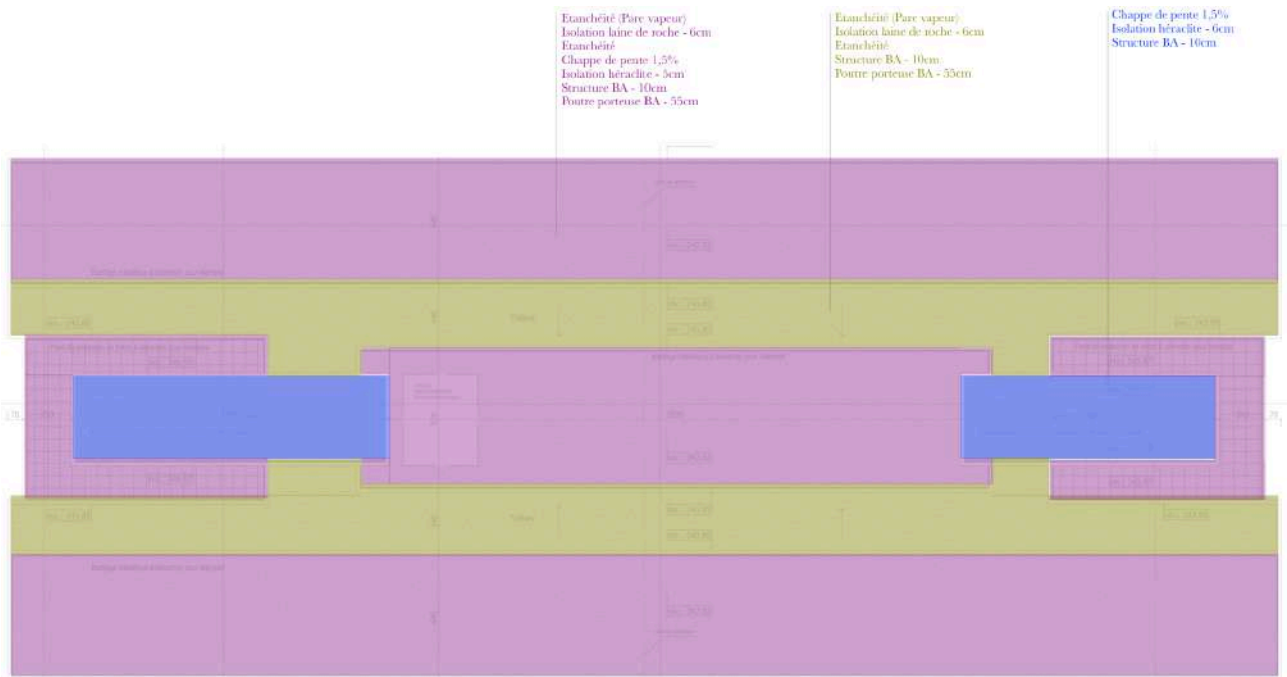
Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R+2): Situation avant rénovation



Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R+3): Situation avant rénovation



Annexe 3 - Composition des parois de chaque zone (R+toiture) : Situation avant rénovation



Annexe 3 - Composition de la toiture: Situation avant rénovation

ANNEXE 4 – DONNÉES ENCODÉES DANS L'ONGLET ÉCLAIRAGE (MODÈLE 1)

ZONE	ECLAIRAGE GÉNÉRAL	
	ON/OFF	DENSITÉ DE PUISSANCE NORMALISÉE [W/m ² . 100Lux]
0	OFF	0
1	ON	7,8
2	ON	7,8
3	OFF	0
15	OFF	0
31	OFF	0
4	ON	3,5
5	ON	7,8
9	ON	7,8
10	ON	7,8
26	ON	7,8
30	ON	7,8
6	ON	7,8
8	ON	7,8
16	ON	7,8
18	ON	7,8
21	ON	7,8
22	ON	7,8
23	ON	7,8
25	ON	7,8
27	ON	7,8
28	ON	7,8
7	ON	7,8
17	ON	7,8
19	ON	7,8
11	ON	3,5
12	ON	5,01
14	ON	3,5
13	ON	3,5
20	ON	7,8
24	ON	7,8
29	ON	7,8

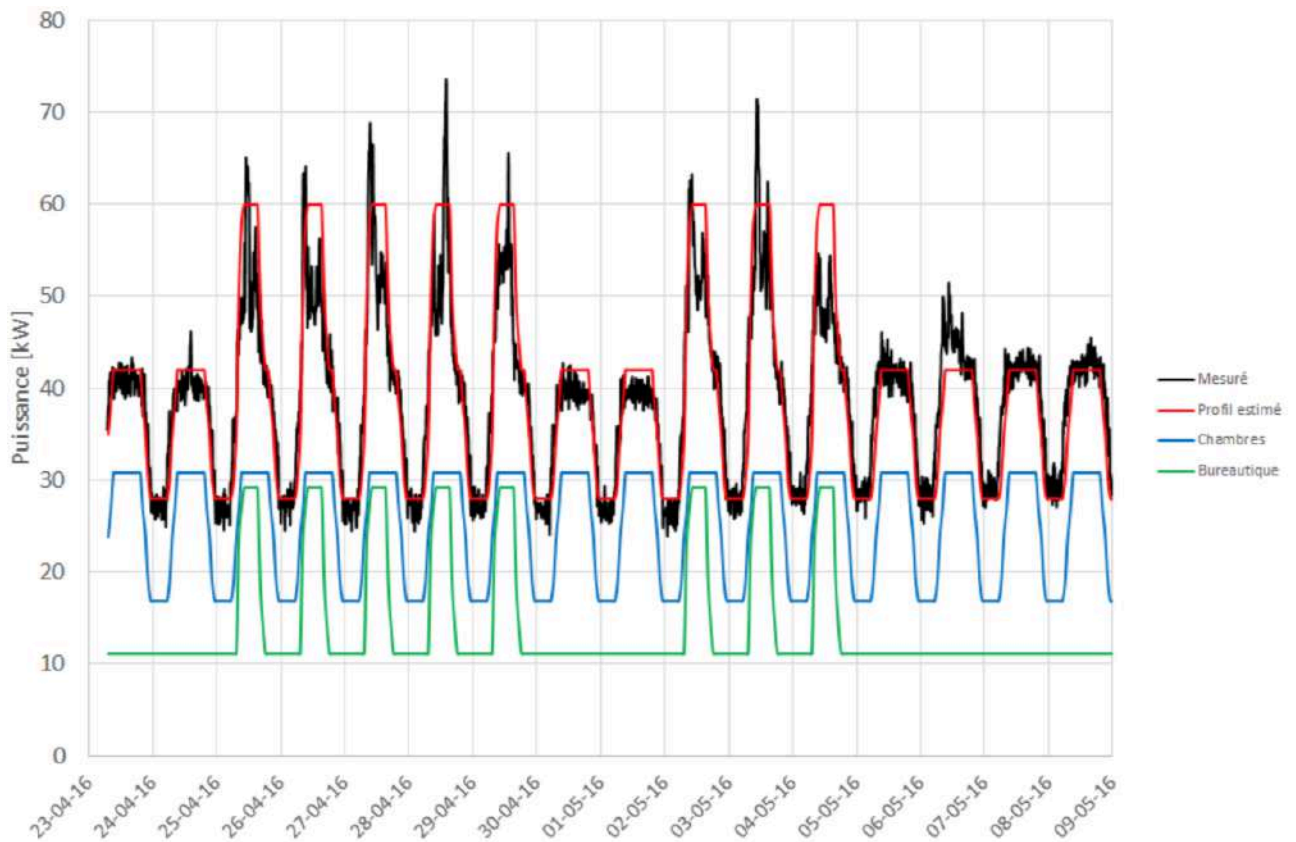
ANNEXE 5 – DONNÉES ENCODÉES DANS L'ONGLET HVAC (MODÈLE 1)

ZONE	VENTILATION MÉCANIQUE							CHAUFFAGE		VENTILATION NATURELLE	REFROIDISSEMENT
	ON/OFF	TYPE DE VENTILATEUR	NOMBRE DE BOUCHES	TAUX [m³/H]	VOLUME [m³]	TAUX [VOL/H]	RENDEMENT [%]	COMBUSTIBLE	COP		
0	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	OFF	/
1	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	OFF	/
2	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	OFF	/
3	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	OFF	/
15	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	OFF	/
31	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	OFF	/
4	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	ON	/
5	ON	Extraction	2	600	4374,3	0,274	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
9	ON	Extraction	0	0	307,88	0,000	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
10	ON	Extraction	0	0	314,71	0,000	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
26	ON	Extraction	2	600	1642,04	0,731	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
30	ON	Extraction	2	600	1620,29	0,741	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
6	ON	Extraction	1	600	1815,53	0,330	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
8	ON	Extraction	0	0	360,6	0,000	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
16	ON	Extraction	3	600	1697,29	1,061	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
18	ON	Extraction	0	0	226,21	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
21	ON	Extraction	3	600	1723,57	1,044	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
22	ON	Extraction	3	600	1679,67	1,072	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
23	ON	Extraction	0	0	676,48	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
25	ON	Extraction	3	600	1685,5	1,068	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
27	ON	Extraction	0	0	259,51	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
28	ON	Extraction	0	0	355,46	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
7	ON	Extraction	0	0	637,17	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	Climatisé
17	ON	Extraction	0	0	262,39	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	Climatisé
19	ON	Extraction	0	0	162,04	0,000	70	Gaz naturel	0,7	OFF	Climatisé
11	ON	Extraction	1	600	1223,03	0,491	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
12	ON	Extraction	1	600	628,44	0,955	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
14	ON	Extraction	0	0	188,54	0,000	70	Gaz naturel	0,7	ON	/
13	ON	Pulsion	1	2400	442,8	5,420	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
20	ON	Extraction	1	600	1481,47	0,405	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
24	ON	Extraction	1	600	1453,7	0,413	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/
29	ON	Extraction	1	600	1476	0,407	70	Gaz naturel	0,7	OFF	/

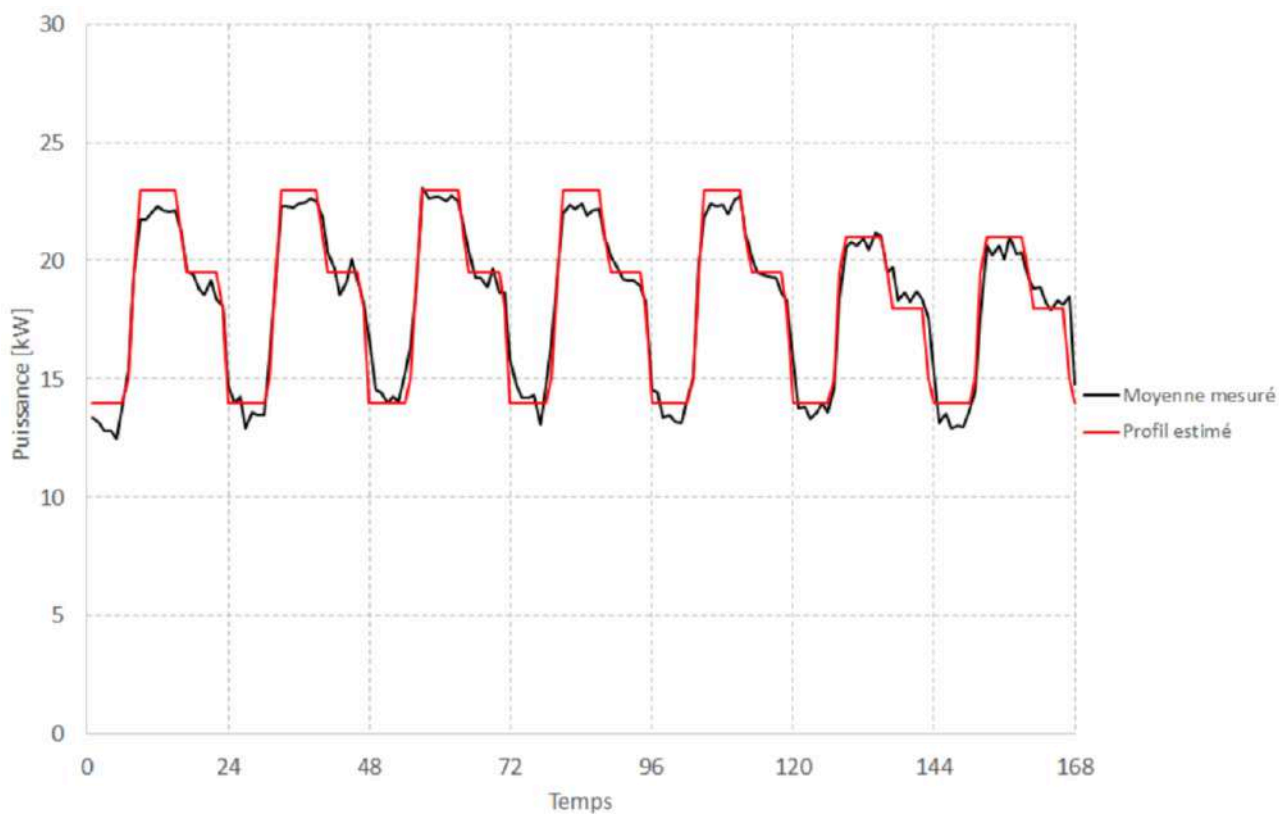
ANNEXE 6 – PROFIL HORAIRE DE LA CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ SUR PLUSIEURS TABLEAUX



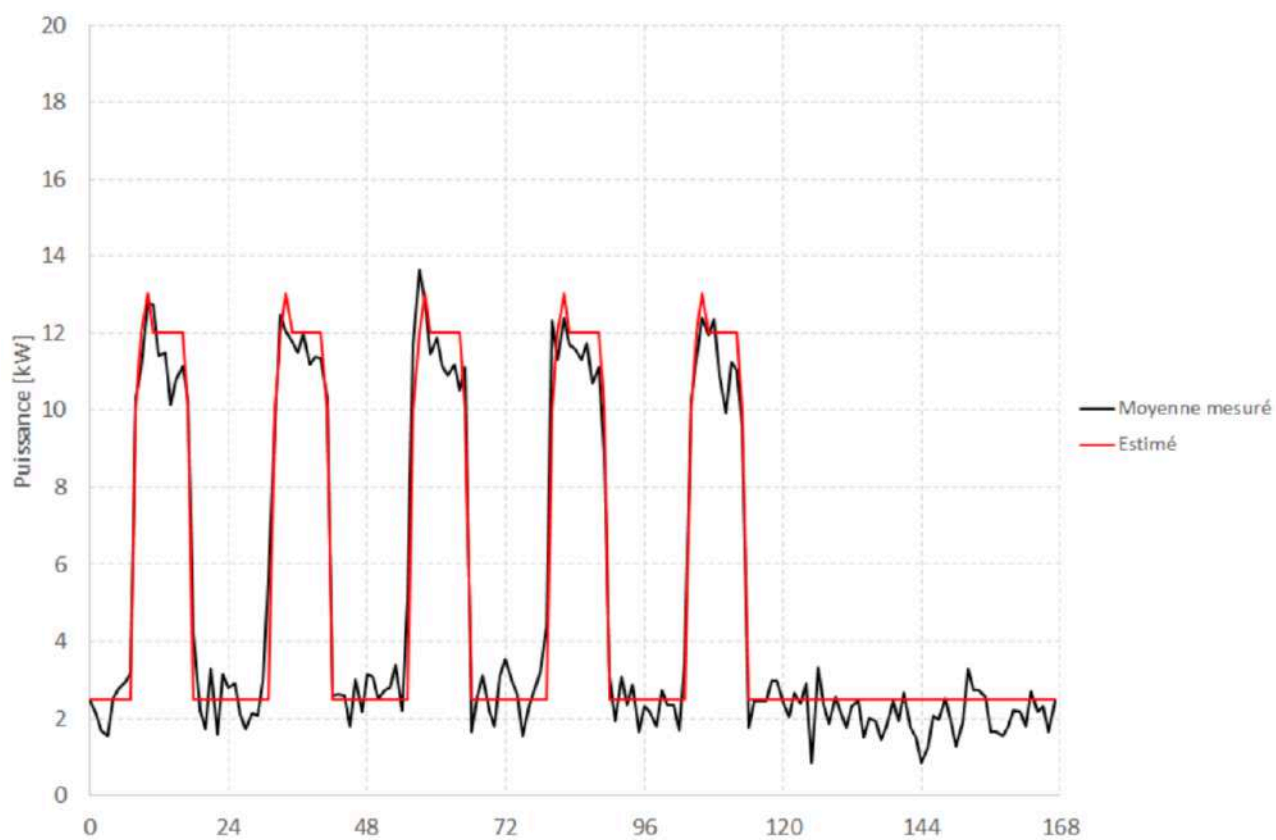
Annexe 6 - Profil horaire de l'éclairage (François Randaxhe, 2016)



Annexe 6 - Profil horaire des équipements de bureau et des chambres froides et de culture (François Randaxhe, 2016)



Annexe 6 - Profil horaire de la sous-station enterrée (François Randaxhe, 2016)



Annexe 6 - Profil horaire de la sous-station de chauffage (François Randaxhe, 2016)

ANNEXE 7 – DONNÉES ENCODÉES DANS L'ONGLET ÉCLAIRAGE (MODÈLE 2)

ZONE	ECLAIRAGE GÉNÉRAL							
	ON/OFF	PUISSANCE DE LA LAMPE [W]	NOMBRE DE LAMPES	PUISSANCE INSTALLÉE [W]	SURFACE DE LA ZONE [m ²]	PUISSANCE PAR UNITÉ DE SURFACE [W/m ²]	INTENSITÉ LUMINEUSE [Lux]	DENSITÉ DE PUISSANCE NORMALISÉE [W/m ² . 100Lux]
0	OFF	/	/	/	/	/	/	/
1	ON	35	16	560	207,2	2,703	175	1,544
2	ON	35	16	560	207,2	2,703	175	1,544
3	OFF	/	/	/	/	/	/	/
15	OFF	/	/	/	/	/	/	/
31	OFF	/	/	/	/	/	/	/
4	ON	28	20	560	250,97	2,231	175	1,275
5	ON	24	55	1320	1299,3	1,016	175	0,581
9	ON	28	25	700	89,3	7,839	175	4,479
10	ON	28	5	140	100,23	1,397	175	0,798
26	ON	28	60	1680	487,25	3,448	175	1,970
30	ON	28	60	1680	480,80	3,494	175	1,997
6	ON	28	60	1680	526,58	3,190	175	1,823
8	ON	28	25	700	104,59	6,693	175	3,824
16	ON	28	60	1680	486,33	3,454	175	1,974
18	ON	28	16	448	64,82	6,911	175	3,949
21	ON	28	60	1680	493,86	3,402	175	1,944
22	ON	28	60	1680	488,28	3,441	175	1,966
23	ON	28	45	1260	196,65	6,407	175	3,661
25	ON	28	60	1680	489,97	3,429	175	1,959
27	ON	28	17	476	77,01	6,181	175	3,532
28	ON	28	25	700	105,48	6,636	175	3,792
7	ON	28	20	560	184,81	3,030	175	1,732
17	ON	28	17	476	75,18	6,331	175	3,618
19	ON	28	10	280	46,43	6,031	175	3,446
11	ON	28	20	560	389,5	1,438	175	0,822
12	ON	28	20	560	200,14	2,798	175	1,599
14	ON	28	10	280	68,188	4,106	175	2,346
13	ON	28	20	560	122,98	4,554	175	2,602
20	ON	24	21	504	424,49	1,187	175	0,678
24	ON	24	20	480	422,59	1,136	175	0,649
29	ON	24	20	480	440,95	1,089	175	0,622

ANNEXE 8 – DONNÉES ENCODÉES DANS L'ONGLET HVAC (MODÈLE 2)

ZONE	VENTILATION MÉCANIQUE				CHAUFFAGE				REFROIDISSEMENT		ENERGIE AUXILIAIRE				
	ON/OFF	TYPE DE VENTILATEUR	NOMBRE DE BOUCHES	TAUX [m³/h]	VOLUME [m³]	TAUX (Vol./h)	RENDEMENT [%]	COMBUSTIBLE	COP		PUISSANCE ÉLECTRIQUE PAR m²/s [Ws/m³]	TAUX [m³/h]	PUISSANCE ÉLECTRIQUE [W]	SURFACE DE LA ZONE [m²]	ENERGIE [W/m²]
0	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
1	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	/	/	/	/	/	/
2	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	/	/	/	/	/	/
3	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
15	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
31	OFF	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4	OFF	/	/	/	/	/	/	Gaz naturel	0,7	/	/	/	/	/	/
5	ON	Pulsion	4	600	4374,3	0,55	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	89,3	1,56
9	ON	Pulsion	3	500	307,88	4,87	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	100,23	1,39
10	ON	Pulsion	3	500	314,71	4,77	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	487,25	0,29
26	ON	Extraction	10	500	1642,04	3,04	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	480,80	0,29
30	ON	Pulsion	10	500	1620,29	3,09	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	526,58	0,26
6	ON	Pulsion	9	500	1815,53	2,48	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	104,59	1,33
8	ON	Extraction	4	500	360,6	5,55	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	486,33	0,29
16	ON	Extraction	16	500	1697,29	4,71	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	64,82	2,14
18	ON	Pulsion	2	500	226,21	4,42	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	493,86	0,28
21	ON	Pulsion	10	500	1723,57	2,90	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	488,28	0,28
22	ON	Extraction	10	500	1679,67	2,98	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	196,65	0,71
23	ON	Pulsion	6	500	676,48	4,43	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	489,97	0,28
25	ON	Pulsion	15	500	1685,5	4,45	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	77,01	1,80
27	ON	Pulsion	2	500	259,51	3,85	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	105,48	1,32
28	ON	Pulsion	5	500	355,46	7,03	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	184,81	0,75
7	ON	Pulsion	7	500	637,17	5,49	85	Gaz naturel	0,7	Climatisé	1000	500	138,89	75,18	1,85
17	ON	Pulsion	3	500	262,39	5,72	85	Gaz naturel	0,7	Climatisé	1000	500	138,89	46,43	2,99
19	ON	Pulsion	2	500	162,04	6,17	85	Gaz naturel	0,7	Climatisé	1000	500	138,89	389,5	0,36
11	ON	Pulsion	13	500	1223,03	5,31	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	200,14	0,69
12	ON	Pulsion	8	500	628,44	6,36	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	500	138,89	68,188	2,04
14	ON	Pulsion	3	500	188,54	7,96	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	1800	500,00	122,98	4,07
13	ON	Pulsion + Extraction	1	1800	352,62	5,10	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	600	166,67	424,49	0,39
20	ON	Pulsion	2	600	1481,47	0,81	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	600	166,67	422,59	0,39
24	ON	Pulsion	2	600	1453,7	0,83	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	600	166,67	440,95	0,38
29	ON	Pulsion	2	600	1476	0,81	85	Gaz naturel	0,7	/	1000	600	166,67	440,95	0,38

Annexe 8 - Données encodées dans l'onglet HVAC de DesignBuilder: Situation après rénovation

ANNEXE 9 – DÉTAIL DES CALCULS DU TEMPS DE RETOUR DE L'ARGENT INVESTI DANS LES TRAVAUX

Tableau Récapitulatif

	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Redevance fixe [€/an]	60,50	60,50	42,35	42,35
Prix de l'énergie pour la consommation [€/an] ¹	72051,963	38667,891	35335,812	10501,794
Cotisation pour l'énergie verte [€/an] ²	28219,814	15144,638	0	0
Cotisation sur l'énergie [€/an] ³	1994,816	1070,552	913,153	271,389
Cotisation fédérale [€/an] ⁴	2722,266	1460,950	568,253	168,885
Redevance de raccordement [€/an] ⁵	641,943	344,510	56,727	16,859
Coût du transport [€/an] ⁶	35606,438	19108,794	1376,575	409,118
Coût de la distribution [€/an] ⁷	79172,97	42489,505	11284,891	3353,867
Montant total annuel [€/an]	220470,71	118347,34	49577,761	14764,262

Prix des travaux [€]	Economies réalisées sur l'électricité [€]	Economies réalisées sur le gaz naturel [€]	Economies totales [€]	Temps de retour de l'argent investi dans les travaux de rénovation [an]
4850000	102123,37	34813,499	136936,869	35,5

1	Avant la rénovation				Après la rénovation			
	Gaz Naturel				Gaz Naturel			
	Consommation annuelle [MWh/an]	TTF103 (Heren) ⁸ [c€/kWh]	Prix trimestriel ⁹ [c€/kWh]	Coût trimestriel [€/trimestre]	Consommation annuelle [MWh/an]	TTF103 (Heren) ⁸ [c€/kWh]	Prix trimestriel ⁹ [c€/kWh]	Coût trimestriel [€/trimestre]
Trimestre 1	756,360	2,383	1,254	9484,199	224,790	2,383	1,254	2818,702
Trimestre 2	756,360	1,571	1,156	8740,768	224,790	1,571	1,156	2597,754
Trimestre 3	756,360	1,145	1,104	8351,444	224,790	1,145	1,104	2482,047
Trimestre 4	756,360	1,591	1,158	8759,401	224,790	1,591	1,158	2603,292
Coût annuel du gaz naturel [€/an]				35335,812				10501,794

1	Avant la rénovation				Après la rénovation			
	Electricité				Electricité			
	Consommation annuelle [MWh/an]	Endex303 ⁸ [c€/kWh]	Prix trimestriel ⁹ [c€/kWh]	Coût trimestriel [€/trimestre]	Consommation annuelle [MWh/an]	Endex303 ⁸ [c€/kWh]	Prix trimestriel ⁹ [c€/kWh]	Coût trimestriel [€/trimestre]
Trimestre 1	855,924	8,497	2,461	21065,785	459,346	8,497	2,461	11305,308
Trimestre 2	855,924	4,728	1,973	16885,209	459,346	4,728	1,973	9061,731
Trimestre 3	855,924	4,267	1,913	16373,867	459,346	4,267	1,913	8787,311
Trimestre 4	855,924	5,487	2,071	17727,092	459,346	5,487	2,071	9513,542
Coût annuel du gaz naturel [€/an]				72051,953				38667,891

2	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346
Coût énergie verte [c€/kWh]	3,297	3,297
Cotisation pour l'énergie verte [€/an]	28219,814	15144,638

3	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Cotisation sur l'énergie [c€/kWh]	0,23306	0,23306	0,12073	0,12073
Cotisation sur l'énergie [€/an]	1994,816	1070,552	913,153	271,389

⁸ Les paramètres d'indexation TTF103 (*Heren*) pour le gaz et Endex 303 pour l'électricité sont renseignés sur le site officiel de ENGIE. Pour les calculs, les paramètres de l'année 2019 ont été sélectionnés (Engie, 2020)

⁹ La formule appliquée pour le gaz naturel est la suivante: $(0,798 + 0,1 \times \text{TTF103} (\text{Heren})) \times 1,21$. Cette formule ainsi que les prix utilisés dans les calculs proviennent de la fiche tarifaire Easy. (Engie, 2020)

¹⁰ La formule appliquée pour l'électricité est la suivante: $(1,124 + 0,1071 \times \text{Endex303}) \times 1,21$. Cette formule ainsi que les prix utilisés dans les calculs proviennent de la fiche tarifaire Easy. (Engie, 2020)

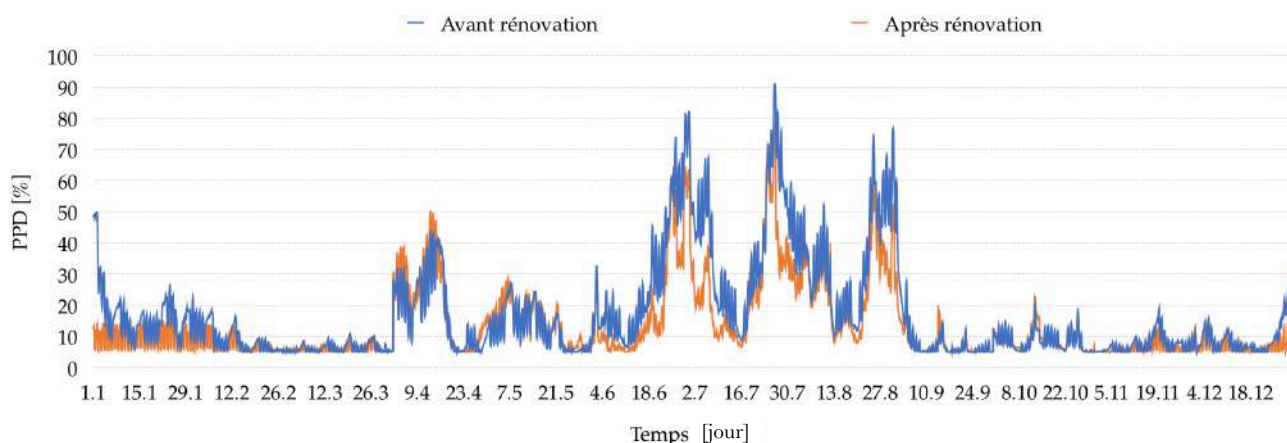
4	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Cotisation fédérale [c€/kWh]	0,31805	0,31805	0,07513	0,07513
Cotisation fédérale [€/an]	2722,266	1460,950	568,253	168,885

5	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Redevance de raccordement [c€/kWh]	0,075	0,075	0,0075	0,0075
Redevance de raccordement [€/an]	641,943	344,510	56,727	16,859

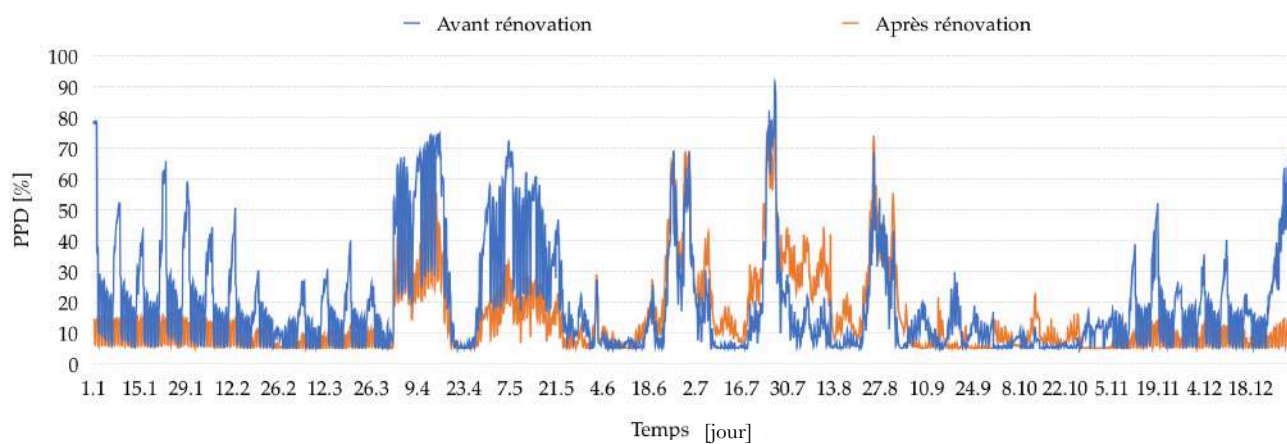
6	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Prix du transport [c€/kWh]	4,16	4,16	0,182	0,182
Coût du transport [€/an]	35606,438	19108,794	1376,575	409,118

7	Avant la rénovation	Après la rénovation	Avant la rénovation	Après la rénovation
	Electricité	Electricité	Gaz Naturel	Gaz Naturel
Consommation annuelle [MWh/an]	855,924	459,346	756,36	224,79
Prix de la distribution [c€/kWh]	9,25	9,25	1,492	1,492
Coût de la distribution [€/an]	79172,970	42489,505	11284,891	3353,867

ANNEXE 10 – PROFILS DE L'INDICATEUR PPD



Annexe 9 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour la zone 18 pour l'année 2019



Annexe 9 - Profil horaire de l'indicateur PPD pour la zone 21 pour l'année 2019